

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики**

**Кафедра теоретичної електротехніки**

«На правах рукопису»

УДК 621.317.3

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М. Я. Островерхов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка**

**на тему: «Математична модель коефіцієнта напруги ємності еталонного  
конденсатора»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕВ-71мп

Захарченко Андрій Олегович

Керівник:

професор кафедри теоретичної електротехніки,

д.т.н, професор, Бржезицький В. О.

Консультант з маркетингу:

ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,

Царьова Т. О.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет електроенерготехніки та автоматики**  
**Кафедра теоретичної електротехніки**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Техніка та електрофізика високих напруг»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

ТОВ «ІНТЕЛТЕХ»

\_\_\_\_\_ О. А. Філонова

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М. Я. Островерхов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Захарченку Андрію Олеговичу**

1. Тема дисертації «Математична модель коефіцієнта напруги ємності еталонного конденсатора», науковий керівник дисертації Бржезицький Володимир Олександрович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 р. №4107-с
2. Термін подання студентом дисертації: 19.12.2018.
3. Об'єкт дослідження: високовольтний еталонний конденсатор з елегазовою ізоляцією
4. Вихідні дані: тип МСР 600, тиск елегазу  $4 \cdot 10^5$  Па, діапазон робочих напруг 0 – 520 кВ, частота 50 Гц
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
  - огляд високовольтних еталонних конденсаторів;
  - високовольтна елегазова ізоляція;
  - високовольтний еталонний конденсатор з елегазовою ізоляцією на 600кВ;

- дослідження характеристик високовольтного еталонного конденсатора з елегазовою ізоляцією на 600кв;
- розроблення стартап-проекту;

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентації:

- параметри високовольтних газонаповнених конденсаторів;
- будова високовольтного газонаповненого конденсатора;
- розрахунок зміни геометричних параметрів електродів конденсатора;
- визначення зміни відношення ємностей  $C2/C1$ ;
- визначення зміни ємності  $C1$ .

7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Маркетинг високовольтного обладнання	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к. е. н.		

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд високовольтних еталонних конденсаторів;	03.09.2018 – 28.09.2018	Виконав
2	Дослідження характеристик високовольтного еталонного конденсатора з елегазовою ізоляцією на 600кв	28.09.2018 – 25.10.2018	Виконав
3	Математична модель зміни характеристик високовольтного еталонного конденсатору	25.10.2018 – 03.12.2018	Виконав
4	Розрахунок ємностей еталонного конденсатору МСР 600 при зміщенні їх осей	03.12.2018 – 17.12.2018	Виконав

Студент

А. О. Захарченко

Науковий керівник дисертації

В. О. Бржезицький

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка виконана на 96 сторінках формату А4, яка включає в себе 24 малюнки, 31 таблицю, 7 джерел використаної літератури, презентація містить 12 слайдів.

В магістерській дисертації розглядається розробка математичної моделі коефіцієнта напруги ємності еталонного конденсатора.

**Актуальність роботи.** Точні вимірювання на електричних станціях та підстанціях, електротехнічних лабораторіях та організаціях, що займаються моніторингом та діагностикою електричного обладнання завжди затребувані серед інженерів-електриків і іншого персоналу, які пов'язані з електроенергетикою.

**Методи, використовувані в магістерській дисертації.** При розробці математичної моделі коефіцієнта напруги ємності еталонного конденсатору, використовувались методи теоретичних основ електротехніки (визначення міжелектродної ємності), методи визначення деформацій електродів під дією сили, непрямі (побічні) методи вирішення системи рівнянь. Для досягнення позитивного результату розробки математичної моделі коефіцієнта напруги ємності еталонного конденсатору потрібно вирішити наступні задачі:

- Розрахувати ємності при нульовому зміщенні осей ємностей  $C_1$  та  $C_2$ .
- Провести вибір зміщення осей ємностей  $C_1$  та  $C_2$ , при якому коефіцієнт їх відношення буде відповідати експериментальним даним.
- Виокремити змінення ємності  $C_1$  при зростанні вхідної напруги конденсатора від 0 до 520кВ.

**Об'єкт дослідження:** високовольтний еталонний конденсатор МСР 600.

**Предмет дослідження:** характеристики еталонного конденсатору при зміні коефіцієнта відношення ємностей.

**Наукова новизна результатів.** На електричних станціях та підстанціях, електротехнічних лабораторіях та організаціях, що займаються моніторингом та діагностикою електричного обладнання широке застосування знайшли еталонні конденсатори. Однією з найважливіших задач при експериментальному дослідженні еталонного конденсатору МСР 600, є досягнення більш точних вимірювань. Проведене в магістерській дисертації дослідження дозволить зменшити похибку вимірювання високої напруги при використанні еталонного конденсатору в 79 разів, тому впровадження виконаної розробки буде користуватись попитом серед користувачів.

**Практична цінність** проведеної розробки полягає в тому, що без перероблення високовольтного еталонного конденсатору, тобто фактично без збільшення його вартості можна суттєво підвищити його точність.

## ABSTRACT

The master's dissertation consists of an explanatory note and a graphic part. The explanatory note is made on 96 pages of A4 format, which includes 24 drawings, 31 tables, 7 sources of used literature, presentation contains 12 slides.

In the master's thesis is considered the development of a mathematical model of the voltage factor of capacitance of the reference capacitor.

**Urgency of work.** Exact measurements at power plants and substations, electrical laboratories, and organizations involved in the monitoring and diagnosis of electrical equipment are always in demand among electrical engineers and other personnel involved with electricity.

**Methods used in the master's dissertation.** In developing the mathematical model of the voltage coefficient of the capacitance of the reference capacitor, methods of theoretical foundations of electrical engineering (determination of inter electrode capacitance), methods for determining the deformations of electrodes under the influence of force, and indirect (side) methods of solving the system of equations were used. To achieve a positive result of developing a mathematical model of the voltage factor of the capacitance of the reference capacitor, the following problems need to be solved:

- Calculate capacitances for zero displacement of the axes of capacities  $C_1$  and  $C_2$ .
- To select the displacement of the axes of capacities  $C_1$  and  $C_2$ , at which the ratio of their ratio will correspond to the experimental data.
- Separate the change in capacitance  $C_1$  at an increase in the input voltage of the capacitor from 0 to 520kV.

**Object of research:** high-voltage reference capacitor MCP 600.

**Subject of research:** characteristics of the reference capacitor when changing the ratio of capacitances.

**Scientific novelty of the results.** Standard capacitors have been widely used at power stations and substations, electrical laboratories and organizations involved

in the monitoring and diagnosis of electrical equipment. One of the most important tasks in the experimental study of the reference capacitor MCP 600 is the achievement of more accurate measurements. The research carried out in the master's dissertation will reduce the error of measurement of high voltage with the use of the reference capacitor in 79 times, therefore the implementation of the development will be in demand among users.

**The practical value** of the development is that without the processing of a high-voltage reference capacitor, that is, without actually increasing its value, it can significantly increase its accuracy.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРЕЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....	10
ВСТУП .....	11
1. ОГЛЯД ВИСОКОВОЛЬНИХ ЕТАЛОННИХ КОНДЕНСАТОРІВ.....	12
1.1. Конденсатори зі стисненим газом .....	12
1.2. Вимоги, що пред'являються до конденсаторів, наповнених стисненим газом. Конструкція конденсаторів .....	13
1.3. Конденсатори, наповнені стисненим газом, на випробувальну напругу 1000 кВ .....	18
1.4. Огляд високовольтної елегазової апаратури. Випробувальні трансформатори з елегазовою ізоляцією .....	23
1.5. Високовольтні вимикачі з елегазовою ізоляцією .....	26
Висновки до першого розділу .....	42
2. ВИСОКОВОЛЬТНА ЕЛЕГАЗОВА ІЗОЛЯЦІЯ .....	44
2.1. Елегаз – середовище для електротехнічного обладнання .....	44
2.2. Електрична міцність елегазу .....	45
2.3. Пробій проміжків з однорідним електричним полем .....	45
2.4. Вплив неоднорідності електричного поля.....	47
2.5. Пробивна напруга проміжків з неоднорідними електричними полями .....	50
2.6. Електрична міцність сумішей елегазу з іншими газами .....	52
2.7. Вплив різних факторів на електричну міцність газового проміжку.....	53
Висновки до другого розділу .....	60
3. ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ЕТАЛОННИЙ КОНДЕНСАТОР З ЕЛЕГАЗОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ НА 600кВ .....	62
3.1. Еталонні конденсатори стиснутого газу, типу МСР .....	62
Висновки до третього розділу.....	70



4. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЕТАЛОННОГО КОНДЕНСАТОРА З ЕЛЕГАЗОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ НА 600кВ .....	71
4.1. Математична модель зміни характеристик високовольтного еталонного конденсатору.....	71
4.2. Розрахунок ємностей еталонного конденсатору МСР 600 при зміщенні їх осей.....	73
Висновки до четвертого розділу.....	81
5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	82
5.1. Опис ідеї проекту .....	82
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту .....	84
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	85
5.4. Розроблення ринкової стратегії.....	90
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	91
Висновки до п'ятого розділу.....	93
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96

## **ПЕРЕЛІК СКОРЕЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

ВВ – високовольтний ввід

КЗ – коротке замикання

ЕК – еталонний конденсатор

ТКС – температурний коефіцієнт ємності

КНС – коефіцієнт напруги ємності

ВЕ – високовольтний електрод

## ВСТУП

Близько 30 років тому повітряні конденсатори Петерсена широко використовувалися в якості порівняльних еталонів при високовольтних вимірах. Внаслідок великих розмірів і особливостей конструкції вони майже не могли пересуватися, а також мали значні втрати завдяки впливу вологи і пилу. Конденсатори зі стисненим газом Новедейза, Шеринга, В'юнга, що застосовуються в якості еталонних конденсаторів в лабораторіях і на випробувальних станціях, не мають зазначених недоліків. Їх головною особливістю є те, що обидва електроди високої та низької напруги - розташовані в камері з ізоляційного матеріалу, так що відпадає необхідність в спеціальному високовольтному вводі. Крім відсутності втрат, перевага цих конденсаторів перед конденсаторами з твердими або рідкими діелектриками полягає в більш високій пробивній напрузі, відсутності старіння, можливості роботи при напрузі, близької до їх власної випробувальної напруги. Останнє обумовлено тим, що пробій цих конденсаторів не залишає після себе шкідливих наслідків за умови, що розрядний струм залишається нижче певної межі завдяки використанню спеціальних засобів захисту. Такі розряди за рахунок створених при цьому процесів, що відбуваються при процесах очищення газу, можуть навіть сприяти покращенню конденсатора, збільшуючи пробивну напругу[4].

Випробувальна напруга для мереж на 380 кВ та 750 кВ, повинна вимірюватись з достатньою точністю хоча б до напруги цього рівня. Поки не вдавалося виготовити чисто омичний опір для вимірювань таких високих напруг з достатньою точністю; крім того, такі опори в багатьох випадках споживають неприпустимо великий струм. Однак при відповідній конструкції виявилось можливим виготовити еталонні конденсатори, які практично не мають втрат, для використання до самих високих напруг[4].

## **1. ОГЛЯД ВИСОКОВОЛЬНИХ ЕТАЛОННИХ КОНДЕНСАТОРІВ**

### **1.1. Конденсатори зі стисненим газом**

Розглянуті конденсатори зі стисненим газом головним чином застосовуються в якості еталонів в вимірах кута діелектричних втрат. При випробуваннях високовольтних трансформаторів за допомогою ємнісних подільників напруги також важливо, щоб використовувані високовольтні конденсатори були без втрат і мали постійні параметри[4].

Іншими областями застосування, в яких важливо не стільки відсутність втрат, скільки сталість величини ємності, є вимір ефективних і пікових напруг, визначення коефіцієнта амплітуди, отримання осцилограм форми хвилі[4].

Зазвичай не потрібно точне знання величини ємності таких конденсаторів, які можуть бути виміряні тільки з точністю до 0,1%. Наприклад, вимірювання, проведені на трансформаторах напруги за допомогою ємнісних подільників напруги, вимагають дуже точної установки відносно ємності, яка повинна бути постійною і має не залежати від температури. В такому дільнику відношення ємностей можна визначати значно точніше, ніж абсолютні величини цих ємностей. Відносно омичних дільників напруги аналогічне твердження не справедливо. Низьковольтне плече ємнісного дільника зазвичай складається з високоякісних слюдяних конденсаторів, температурна залежність яких може бути абсолютно однакова з температурною залежністю конденсаторів, наповнених стиснутим газом. При підвищенні температури на  $10^{\circ}\text{C}$  тиск газу в конденсаторі зростає на 3,67%, тобто, наприклад, від 14 до 14,5 атмосфер. Підвищення тиску на 0,5 атмосфер збільшує діелектричну постійну азоту на 0,029%, а отже, і ємність конденсатора зі стисненим газом (азотом) на ту ж величину. Можуть бути внесені поправки на малий кут втрат слюдяних конденсаторів, так як цю величину можна вимірювати досить точно. У дуже точних вимірах при порівнянні трансформаторів напруги з еталонними дільниками повинна прийматися до уваги і мала похибка цих еталонів[4].

## **1.2. Вимоги, що пред'являються до конденсаторів, наповнених стисненим газом**

Конденсатори зі стисненим газом відповідають наступним електричним, механічним і економічним потребам:

1. Відсутність втрат.
2. Стабільність величини ємності.
3. Незалежність від зовнішніх полів.
4. Газонепроникність.
5. Достатня механічна міцність.
6. Приблизна рівність внутрішньої пробивної напруги напрузі зовнішнього перекриття.
7. Допустимість найбільших можливих напруг при можливо малих розмірах.

Відсутність втрат в конденсаторах Шеринга і В'юнга, наповнених стиснутим газом, в більшості досягається за рахунок їх конструкції. Циліндричний електрод низької напруги поміщений всередині циліндричного електрода високої напруги, а заземлена опорна трубка, яка оточує вивід вимірювального електрода, виконує роль електростатичного екрану. Поверхня електродів має високу ступінь чистоти і гладко відполірована, так щоб при максимально допустимих робочих напругах між електродами не виникав коронний розряд[4].

Сталість ємності забезпечується конструкцією конденсатора, при якій взаємні зміщення електродів неможливі. У свою чергу повне екранування вимірювального електрода високовольтним електродом усуває вплив навколишніх умов на величину тангенса кута втрат і ємності. Зміни ємності в результаті теплового розширення мізерно малі. Єдині зміни ємності викликаються коливаннями тиску газу і можуть відраховуватися прямо по манометру. Звичайне збільшення ємності таких конденсаторів в області

надлишкових тисків 10-14 атмосфер становить близько 0,058% на одну атмосферу для азотного наповнення і 0,1% для наповнення вуглекислим газом[4].

Конденсатор, наповнений газом під тиском, повинен бути газонепроникним, щоб виключити необхідність догляду за ним. Єдиною важливою проблемою при цьому є виготовлення газонепроникних твердих паперових труб, особливо великих розмірів. Однак в даний час є такі труби, досить високоякісні і порівняно великих діаметрів при довжині до 3 м[4].

Однією з головних задач при конструюванні конденсаторів зі стисненим газом є забезпечення механічної міцності[4].

У великих конденсаторах навантаження, яка припадає на плиту підстави, може досягати 36 т; крім того, до деяких частин повинен бути доданий тиск для забезпечення повної герметичності конструкції, що призводить до необхідності використання сил затискання між фланцем і циліндром. Взагалі гаряча посадка фланців виявилася вельми задовільною. Для труб великого діаметру застосовується більш надійний метод посадки фланця на циліндр з розклинням. Висока міцність використовуваних твердих паперових труб підтверджується тим, що вони витримують без пошкодження в процесі типових випробувань тиск до 200 атмосфер, тоді як робочий тиск не перевищує 14 атмосфер. Відомі випадки, коли конденсатори зі стисненим газом потрапляли в вогонь і повністю обвуглювалися. Після видалення обвугленого шару на токарному верстаті і повторного лакування поверхні конденсатори знову ставали придатними до експлуатації. Конденсатор, наповнений стисненим газом економічний, якщо його внутрішня пробивна напруга того ж порядку, що і напруга зовнішнього перекриття, і одночасно відношення діаметра до довжини твердої паперової труби таке, що в установленому вигляді конденсатор має можливо меншу висоту. Однак діаметр труби не повинен бути занадто великим, так як механічні зусилля, що розвиваються в торцевих частинах конденсатора, дуже великі і вимагають в цьому випадку великих затрат на створення надійних

герметичних з'єднань. З іншого боку, подовження труби за рахунок зниження діаметра, цілком ймовірно, не впливає на напругу зовнішнього покриття[4].

### 1.3. Конструкція конденсаторів

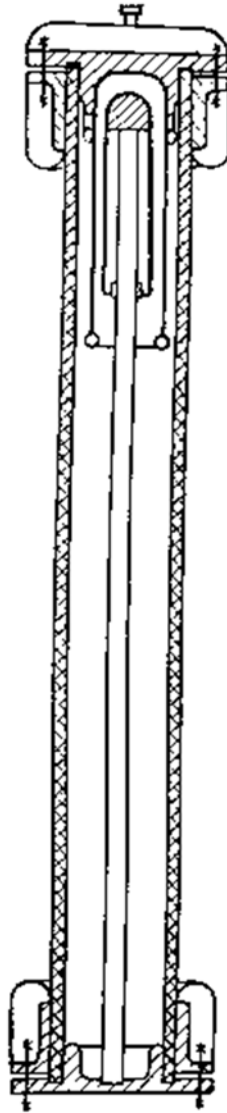


Рис. 1.1. Конструкція конденсатора зі стисненим газом ємністю 45 пФ на напругу 370 кВ, побудована Шерінгом і В'юнгом.

На рис. 1.1 показана конструкція конденсатора зі стисненим газом ємністю 45 пФ на напругу 370 кВ, побудована Шерінгом і В'юнгом. Зовнішнім ізолятором служить довгий паперовий циліндр, закритий зверху і знизу

металевими плитами. Електрод високої напруги прикріплений до верхньої плити, яка циліндричною частиною входить всередину ізоляційної труби. Циліндричний електрод низької напруги поміщений всередині високовольтного електрода і спирається через відповідний ізолятор на металеву трубу, закріплену в нижній плиті. Підведення до електрода низької напруги пропущено через заземлену опорну трубу і таким чином екрановано від полів розсіювання[4].

Особливістю цього конденсатора є велике відношення висоти до діаметру. Довжина твердого паперового циліндра може бути скорочена вдвічі без зменшення робочої напруги конденсатора внаслідок того, що розподіл потенціалів уздовж поверхні ізоляційного циліндра нерівномірний і максимальна напруженість електричного поля, існуюча на кінці електрода високої напруги, майже не залежить від висоти ізоляційного циліндра[4].

#### Регулювання характеру поля

Симетричний розподіл потенціалів уздовж ізоляційного циліндра має місце в тому випадку, коли електрод високої напруги виступає до середини ізоляційної труби (рис. 1.2). Крива розподілу потенціалів *б* відповідає більш короткому електроду високої напруги, крива *в* - більш довгому. Краї електрода високої напруги зроблені у вигляді кільця, для того щоб запобігти передчасному тліючому розряду по поверхні паперової труби або передчасною пробойом на опорну металеву трубку електрода низької напруги. Нижній кінець електрода високої напруги має конічну форму, для того щоб зовнішня частина електричного поля електрода не проходила через ізоляційну оболонку. Одночасно цим досягається те, що пробій між кільцевою кромкою електрода високої напруги і заземленою опорною трубкою настає раніше появи коронного розряду між електродами, завдяки чому забезпечується робота конденсатора без втрат аж до напруги пробойом[4].



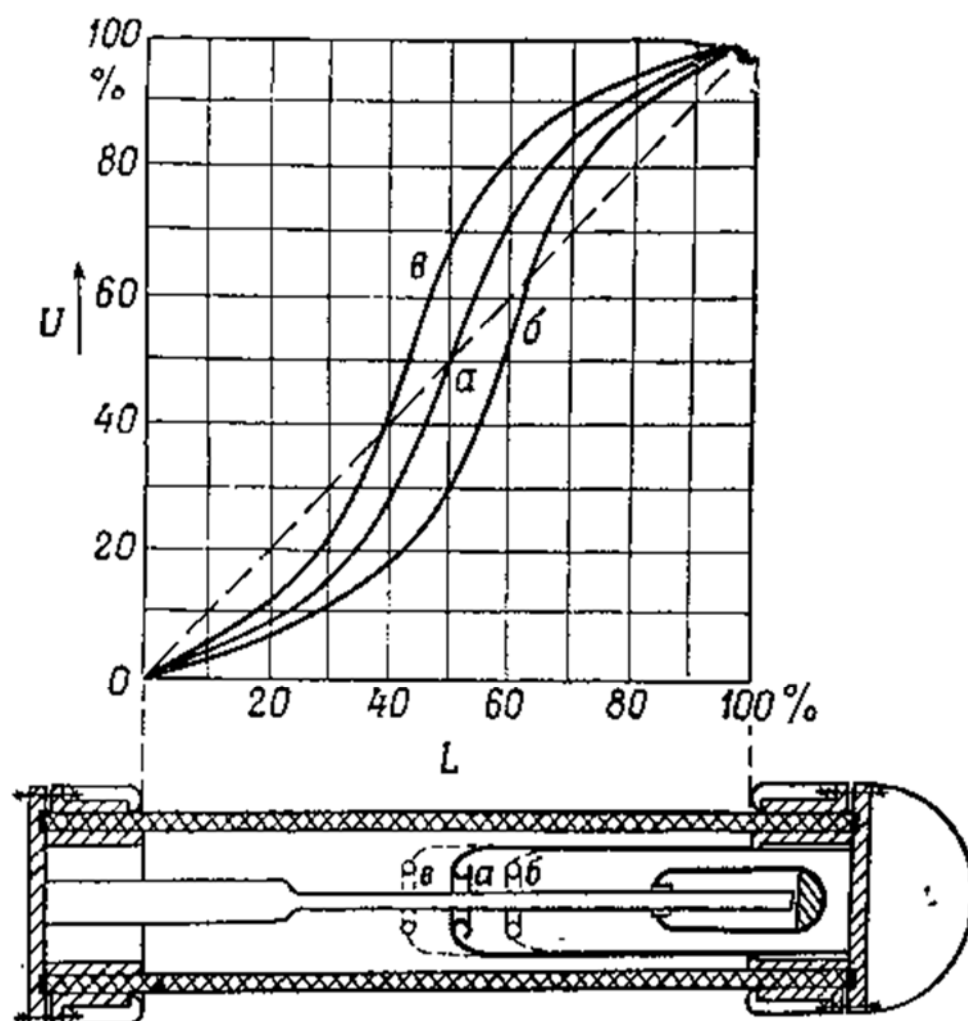


Рис. 1.2. Характер розподілу напруги вздовж поверхні ізоляційного циліндра конденсатора для різних довжин високовольного електрода.

#### 1.4. Конденсатори, наповнені стисненим газом, на випробувальну напругу 1000 кВ

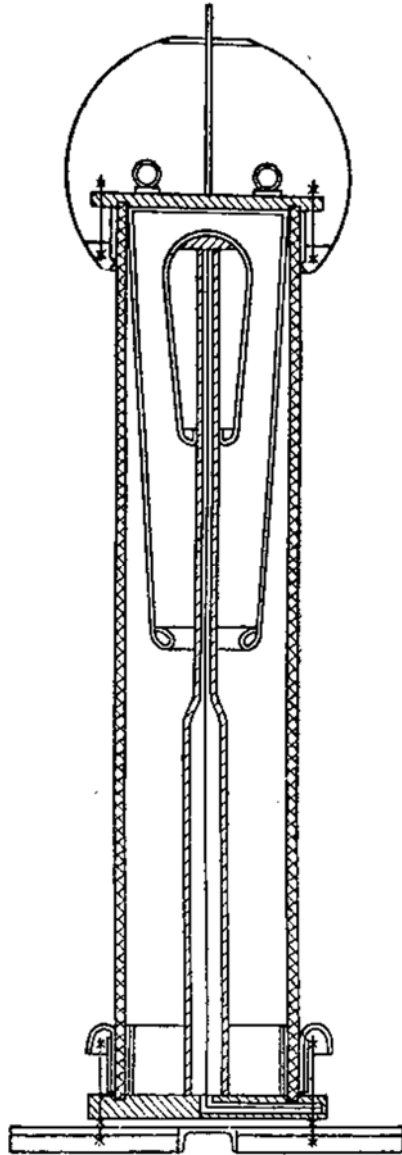


Рис. 1.3. Конденсатор зі стисненим газом на робочу напругу 900кВ (еф.) із застосуванням випробувального напруги 1000кВ (еф.) ємністю 60 пФ.

Для підвищення напруги зовнішнього перекриття конденсатора необхідно домагатися якомога вищої одномірності розподілу напруги вздовж поверхні ізолюючого циліндра. Поле не можна регулювати металевими вставками, оскільки тверді паперові труби при цьому перестають бути газонепроникними[4].

Рівномірність розподілу напруги може бути значно поліпшена додаванням високовольного електрода конічної форми на можливо більшу довжину. Це означає, що для забезпечення досить великої ємності електрод низької напруги теж повинен мати таку форму. З іншого боку, збільшення конусності високовольного електрода призводить до збільшення діаметра труби, що при тій же довжині труби в свою чергу покращує рівномірність розподілу напруги. Однак, як зазначалося вище, з економічних і механічних міркувань має бути витримано певне співвідношення між довжиною і діаметром труби. З технологічних причин найбільша довжина труби обмежена 310 см, що побічно визначає найбільшу напругу, на яку можуть бути побудовані за принципом Шеринга і В'юнга, конденсатори, наповнені стисненим газом[4].

Виходячи з цих міркувань, був розроблений конденсатор. Цей конденсатор (рис. 1.3) наповнений вуглекислим газом з надлишковим тиском 14 атмосфер, витримує випробувальну напругу 1000 кВ і працює при напрузі 900 кВ, його ємність дорівнює 60 пФ, висота конденсатора становить 4 м (включаючи основу і сферичний ковпак), вага 1500 кг. На рис. 1.4 показаний перший з побудованих на таку високу напругу конденсатор. Поруч для порівняння представлені конденсатори, створені Хартманом і Брауном (Франкфурт-на-Майні) на робочі напруги 500, 250, 120 кВ [4].

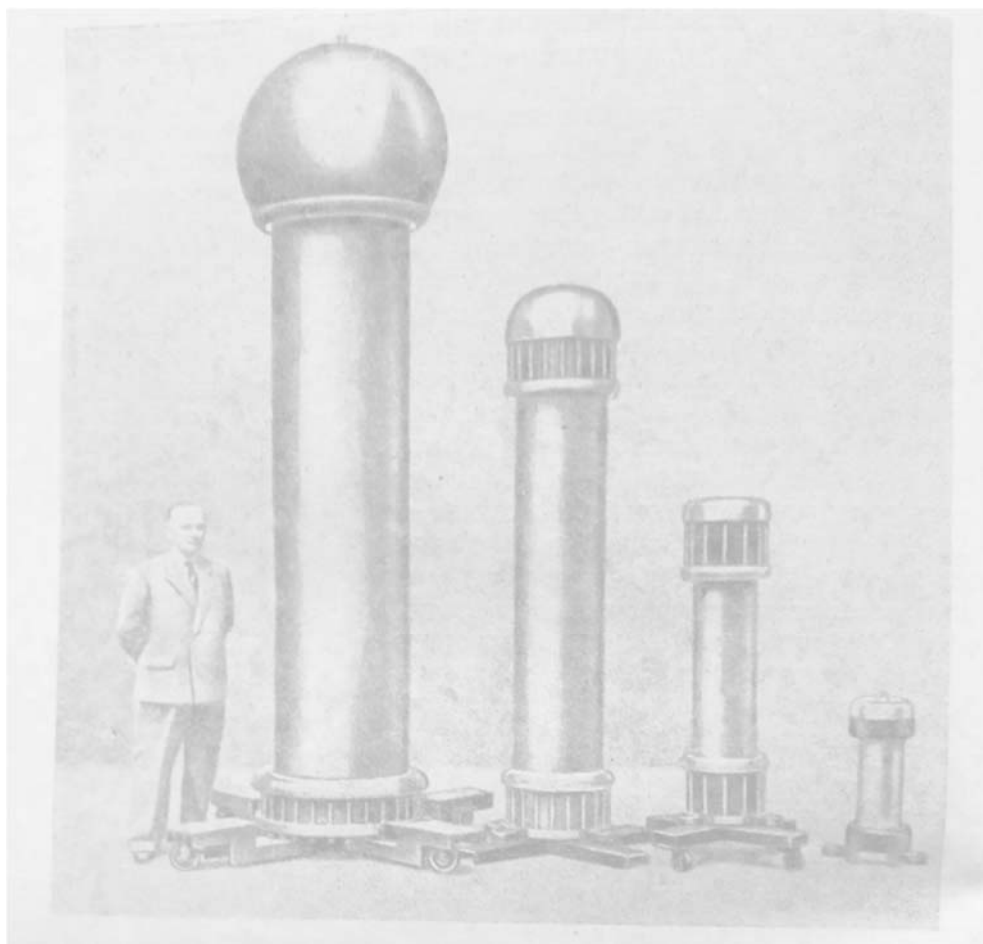


Рис. 1.4. Конденсатори зі стисненим газом на напруги 120, 250, 500, 900 кВ (еф.) ємністю 100, 100, 50, 60 пФ відповідно.

Конденсатори зі стисненим газом в якості ізоляторів високовольтних вводів[4].

З метою економії місця бажано використовувати конденсатор зі стисненим газом одночасно як ізолятор високовольтного вводу, що дає велику економію коштів. На рис. 1.5 показаний конденсатор зі стисненим газом, виконаний у вигляді бушинга[4].

Зовні він схожий на два послідовно з'єднаних конденсатора, а конструкція його відрізняється від звичайної тим, що електроди поміняні місцями: внутрішній електрод високовольтний, а зовнішній низьковольтний. Ці вимірювальні електроди укладені з обох кінців в заземлені металеві розтруби, так що залишається лише невеликий повітряний проміжок. Така

конструкція є ємнісним екраном і дозволяє отримати потрібний характер поля[4].

Величину ємності такого бушинга можна легко збільшити шляхом заміни металевго кільця (рис. 1.5), розташованого між двома ізоляційними циліндрами, довшою металевою трубою. Обидва електроди повинні бути подовжені в тій же мірі. Якщо такий ввід використовується на відкритому повітрі, він повинен бути забезпечений, подібно до звичайних бушингів, запобіжної оболонкою[4].

#### Можливість подальшого підвищення напруги

Існує метод, на основі якого можуть бути побудовані конденсатори зі стисненим газом на напруги понад 1000 кВ. Відомо, що максимальна напруга, на яку можуть бути побудовані ці конденсатори, обмежена максимально можливою по технологічним міркуванням довжиною паперових труб, величиною механічних зусиль на кінцях труб при великих діаметрах, а також через нерівномірний розподіл напруги вздовж поверхні труб. Ці обмеження можуть бути подолані шляхом використання еластичних, типу гуми, ізоляційних камер. Висота яких може досягати 10 м. При наявності потовщення в середній частині досягається велика рівномірність розподілу напруги вздовж поверхні, а отже, і більш високу напругу перекриття. Для підвищення напруги використовують циліндричний високовольтний електрод і збільшують відстань між обома електродами, а також між кільцевою кромкою високовольтного електрода і заземленою опорною трубкою[4].

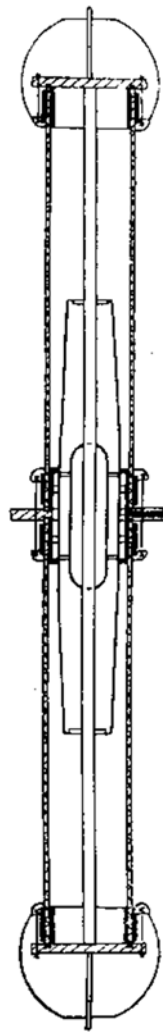


Рис. 1.5. Конденсатор зі стисненим газом, зроблений у вигляді ізолятора високовольтного введення.

Безперервне зростання напруги лінії змінного струму вимагає використання еталонів, що дозволяють вимірювати з великою точністю високі напруги. Практично це здійснено шляхом застосування конденсаторів зі стисненим газом. У даній роботі описані переваги цих конденсаторів порівняно з конденсаторами інших типів, вказані різні області їх застосування одночасно з вимогами, яким вони повинні при цьому задовольняти, перераховані основні особливості їх конструкції. Останнім досягненням в цій області є створення конденсатора на випробувальну напругу 1000 кВ і робочу напругу 900 кВ (еф.) ємністю 65 пФ, наповненою вуглекислим газом під тиском 14 атмосфер. Це перший еталонний конденсатор, побудований на таку

високу напругу у вигляді єдиного блоку. На закінчення наведені рекомендації по створенню конденсаторів зі стисненим газом на ще більш високі напруги[4].

### **1.5. Огляд високовольної елегазової апаратури. Випробувальні трансформатори з елегазовою ізоляцією**

Розглянемо випробувальні трансформатори з елегазовою ізоляцією, які були випущені Українським інститутом трансформаторобудування[2].

Одним із перших ІОГ - 250. Він є однофазним та використовується в мобільній випробувальній лабораторії для випробування ізоляції високовольної апаратури короткочасною напругою частотою 50 Гц, що дає можливість вимірювати ємність ізоляції, тангенс кута діелектричних втрат[2].

Особливими відмінностями його є те, що він пожежо- та вибухобезпечний, має малі габарити та масу. Через лінійний вивід обмотки високої напруги виведений силіконовий ізолятор. Високовольтний елегазовий конденсатор є в конструкції, до якого можна підключити прилади для вимірювання ємності, рівня часткових розрядів та тангенсу кута діелектричних втрат. Також є індуктивний подільник напруги на основі обмотки високої напруги, який дає змогу після підключення вольтметра з великим вхідним опором вимірювати напругу, яку дає нам трансформатор[2]. Зовнішній вигляд трансформатору ІОГ-250 на рисунку 1.6

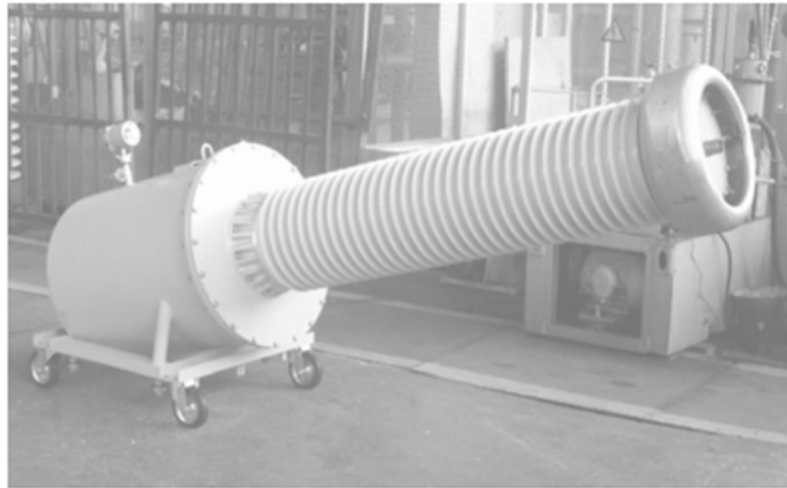


Рисунок 1.6. Випробувальний трансформатор ІОГ – 250[2]

Технічні характеристики даного трансформатору в вигляді таблиці 1.1

Параметр	Значення
Номінальна вхідна напруга, В	220
Діапазон вихідних напруг, кВ	від 10 до 250
Максимальна потужність навантаження, кВ*А	30
Напруга гасіння часткових розрядів, не менше, кВ	200
Рівень ЧР при напрузі їх гасіння, не більше, пКЛ	5
Найбільший час неперервної роботи при максимальній потужності, хв	5
Робочий тиск елегазу при t=20 С, Мпа	0,11
Випробувальна напруга промислової частоти	
Обмотки низької напруги, нейтралі обмотки високої напруги і виводу вбудованого конденсатору, кВ	2
Виводу А обмотки високої напруги, кВ	290
Маса	650

Таблиця 1.1. Технічні характеристики ІОГ – 250[2]

Наступним в серії буде ІОГ – 350, він має такі ж особливості як і попередній до нього ІОГ – 250. Він має два високовольтні конденсатори, що дозволяють проводити виміри[2].

Зовнішній вигляд ІОГ – 350 - І на рисунку 1.7.





Рисунок 1.7. Випробувальний трансформатор ІОГ – 350 – І[2]

Технічні характеристики даного трансформатору в таблиці 1.2.

Параметр	Значення
Номінальна вхідна напруга, В	380
Діапазон вихідних напруг, кВ	від 30 до 350
Діапазон робочих ємностей навантаження пФ	до 3700
Напруга гасіння часткових розрядів, не менше, кВ	320
Рівень ЧР при напрузі їх гасіння, не більше, пКЛ	5
Найбільший час неперервної роботи при струмі 0,41;0,18 , хв	1;15
Робочий тиск елегазу при t=20 С, Мпа	0,3
Випробувальна напруга промислової частоти	
Обмотки низької напруги, нейтралі обмотки високої напруги і виводу вбудованого конденсатору, кВ	2
Виводу А обмотки високої напруги, кВ	395
Струм короткого замикання в обмотці високої напруги, не менше, А	1
Маса	1280

Таблиця 1.2. Технічні характеристики ІОГ – 350 – І[2]

Наступними в серії стали ІОГ – 450 та ІОГ – 500, вони конструктивно подібні до попередників[2].

Зовнішній вигляд на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8. Зовнішній вигляд ІОГ – 450 та ІОГ – 500[2]

Технічні характеристики цих трансформаторів.

Параметр	ІОГ-450	ІОГ-500
Номинальна вхідна напруга, В	380	380
Номинальна вторинна напруга, кВ	450	500
Діапазон робочих ємностей навантаження пФ	до 2200	до 2200
Напруга гасіння часткових розрядів, не менше, кВ	220	260
Рівень ЧР при напрузі їх гасіння, не більше, пКЛ	5	5
Робочий тиск елегазу при t=20 С, Мпа	0,39	0,39
Максимальна потужність навантаження, кВ*А	140	173
Маса	770	795

Таблиця 1.3. Технічні характеристики ІОГ – 450 та ІОГ – 500[2]

Далі розглянемо високовольтні елегазові вимикачі, в конструкціях яких використовуються вводи типу “повітря-елегаз”[2].

### **1.6. Високовольтні вимикачі з елегазовою ізоляцією**

В 1995 році була розпочато розроблення серії елегазових вимикачів з автономними приводами і вбудованими трансформаторами струму. Їх

актуальність обумовлювалася багатьма факторами, наприклад: зростанням потреби енергосистеми в сучасному комутаційному обладнанні, пов'язаним із значним моральним та фізичним старінням експлуатаційного обладнання (маломасляні, масляні, повітряні вимикачі); необхідністю завантаження промислових потужностей виробників, які в свою чергу несуть значні втрати в зв'язку з різким падінням попиту на дороге обладнання для КРУЕ; необхідністю протистояти експансії зарубіжних фірм елегазового обладнання на ринок[1].

Головними перевагами бакових вимикачів зі вбудованими трансформаторами струму перед комплектами “колонковий вимикач плюс окремо стоячий трансформатор струму” є: менша площа території підстанції, підвищена сейсмостійкість, менший обсяг потрібних фундаментальних робіт при будівництві підстанцій, збільшена безпека персоналу підстанції (гасильні апарати розташовані в заземлених металевих резервуарах), можливість використання підігріву елегазу при використанні в районах з прохолодним кліматом. Також, слід відмітити, як показує світовий досвід, починаючи з класів напруги 300-400 кВ і вище, ціна бакових вимикачів з вбудованими трансформаторами струму стає порівнянною з ціною комплектів “колонковий вимикач плюс окремо стоячий трансформатор струму”. Так як окремо стоячі бакові вимикачі мають високу ступінь уніфікації з вимикачами КРУЕ (дугогасильні апарати, опорні конструкції, резервуари і т. д.), тому, враховуючи викладені думки, а також, виходячи з виробничих можливостей заводів-виробників, які створювали обладнання для КРУЕ і повітряні бакові вимикачі, було прийнято рішення розпочати розробку серії бакових елегазових вимикачів[1].

Найменування параметру	ВГБУ-110	ВГБУ-220	ВГБ-330	ВГБ-500	ВГБ-750
Число розривів на полюс	1	1	1;2	2	2
Номинальна/найбільша робоча напруга, кВ	110/126	220/256	330/363	500/525	750/787
Номинальний струм, А	2000		3150		4000
Номинальний струм відключення, А	40;50	40	40;-63	40;50	50
Випробувальні напруги					
однохвилина промислової частоти, кВ	230	440	560	760	950
грозового імпульсу, кВ	520	1050	1380	1550	2100
між контактами відносно землі	450	900	1175	1550	2100
Повний час відключення, с	0,055				0,04
Повний час включення, с	0,15				
Допустиме число операцій В/В в діапазоні від 60% до 100% від Іном	20;/10				18;/9
Питома довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції, см/кВ	2,25				

Таблиця 1.4. Основні технічні характеристики серії елегазових бакових вимикачів типу ВГБ

Одним із перших в цій серії став вимикач з автономним гідравлічним приводом і вбудованим трансформатором струму. Він має трифазне управління (один привод на три фази) та забезпечений фарфоровими покриттями введів “повітря-елегаз”. Пізніше був розроблений аналогічний вимикач ВГБУ-110-40/2000 У1, основною різницею якого від прототипу є те, що в ньому в якості покриттів введів “повітря-елегаз” використовуються полімерні ізолятори. На рисунку 1.4 приведений розріз цього апарату, на рисунку 1.5 – зовнішній вигляд[1].

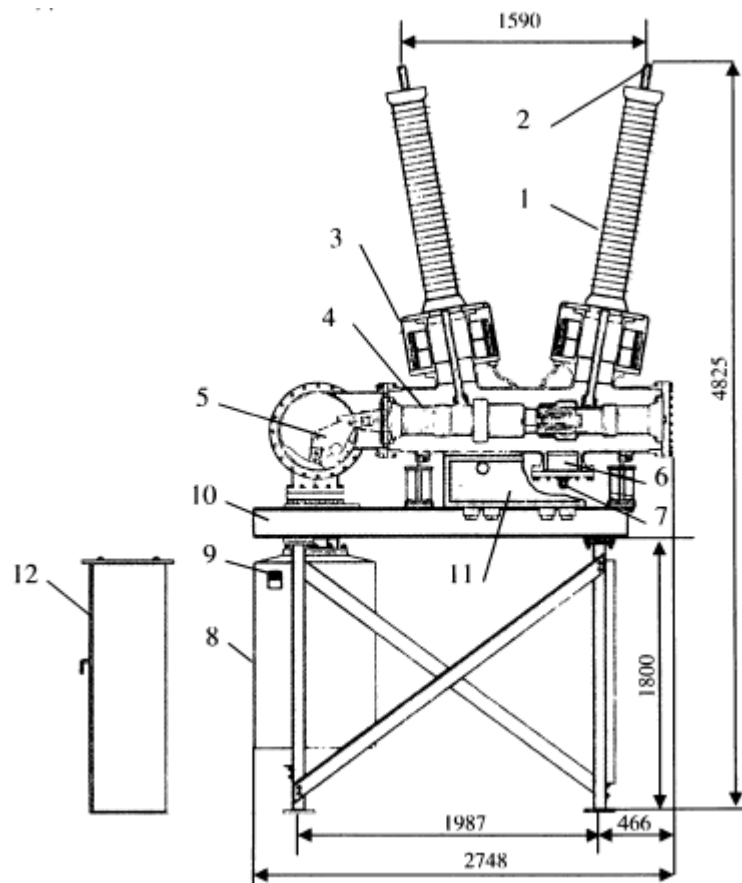


Рисунок 1.9. Розріз ВГБ-110-40/2000 У1

1. Ввід;
2. Контактна пластина;
3. Блок трансформаторів струму
4. Дугогасильний пристрій;
5. Передаточний механізм; Ф
6. Фільтр;
7. Роз'єм для заповнення елегазом;
8. Гідропривід;
9. Показник положення;
10. Рама;
11. Шафа клемних коробок;
12. Апаратна шафа.



Рисунок 1.10. Зовнішній вигляд ВГБ-110-40/2000 У1

В вимикачі використовується однорозривний дугогасильний пристрій автокомпресійного типу, принцип дії заснований на інтенсивному обдуві, яке обумовлюється при розмиканні контактів дуги особливим шляхом, тобто сформованим потоком елегазу, стиснутого в спеціально об'ємі в процесі переміщення рухомої системи[1].

Конструкція цього вимикача складається з трьох дугогасильних камер, розташованих в алюмінієвих резервуарах, які розташовані на загальній рамі. Рухомі системи цих трьох пристроїв через важелі зв'язані з одним загальним валом, який, в свою чергу, через важіль і шток пов'язаний зі штоком приводу, який встановлений на тій же загальній рамі. Таким чином, зворотно-поступально вертикальний рух штоку приводу за допомогою валу і важелів перетворюється в зворотно-поступально горизонтальний рух рухомих систем дугогасних пристроїв[1].

Гідравлічні приводи, які використовуються в розглянутих вимикачах, так і решта апаратів цієї серії, подібні приводам, які використовуються в вимикачах для КРУЕ тільки з тією різницею, що гідропривід для апарату зовнішньої установки має покращену систему обігріву, теплоізоляцію і дещо інший набір елементів низьковольтної апаратури[1].

Однією з особливостей даного вимикача є те, що весь передаточний механізм (важільна система, вал з підшипниками і т. д.) розміщений в спеціальному корпусі, заповненому елегазом, що дає можливість отримати ряд визначних переваг. По-перше, всі найвідповідальніші механічні елементи вимикача (наприклад, вузли тертя) є в абсолютно інертному середовищі і цілковито не мають зовнішніх кліматичних та інших впливів, що, означає збільшення надійності даного апарату. По-друге, така конструкція дозволяє мати всього одне рухоме ущільнення “повітря-елегаз” на весь вимикач, що також призводить до збільшення надійності. По-третє, корпус передаточного механізму об’єднує резервуари всіх трьох фаз в один великий обсяг, що дає можливість відмовитися від використання мембранних запобіжних пристроїв. Сумарний об’єм елегазу настільки великий, що якщо в разі виникнення аварійної ситуації - пробої на корпус і горінні внутрішньої дуги короткого замикання протягом 0,3 с - енергії буде недостатньо для того, щоб тиск нагрітого елегазу досяг критичного значення, при якому може виникнути руйнування резервуарів вимикача. Окрім того, наявність одного загального об’єму означає потребу використання лише одного дороговартісного приладу контролю щільності елегазу[1].

На горловинах дугогасних пристроїв розташовані блоки вбудованих трансформаторів струму. Зазвичай, на кожній фазі розміщуються чотири обмотки - три захисні і одна вимірювальна, по дві на кожній горловині. Таке розташування трансформаторів струму (з обох сторін від розриву вимикача) дає змогу без особливих труднощів організувати диференційний захист на підстанції. У випадку використання колонкового вимикача для організації диференційного захисту потрібно встановлювати два окремо стоячих трансформатори струму - по одному з обох сторін від вимикача. Також важливою особливістю розглянутої конструкції є те, що ці обмотки вбудованих трансформаторів струму розташовані поза герметичних об’ємів і спроектовані таким чином, що їх демонтаж може бути здійснений без

розгерметизації вимикача. При потребі на кожній фазі може бути встановлено по шість та більше обмоток[1].

На блоках трансформаторів струму встановленні вводи “повітря-елегаз”. Конструкція вводів створена на основі розрахунків напруженості електричного поля, які підтверджені експериментальними даними. В якості покриттів вводів в більшості використовуються полімерні ізолятори. Головні переваги таких ізоляторів перед фарфоровими - це їх менша вага, більш висока міцність при згині і розтязі, збільшена сейсмостійкість. Відомо також, що при необережному транспортуванні фарфорових ізоляторів можлива поява мікротріщин в тілі фарфору, які можуть спричинити повне руйнування ізолятору. Основна задача, яка стоїть перед розробниками вводів “елегаз-повітря”, це створення конструкції, яка може витримувати випробувальні впливи і в першу чергу високовольтні випробування. При цьому слід врахувати вплив сусідніх вводів і близько розташованих заземлених частин вимикача, головні вимоги по відсутності видимої зовнішньої корони при номінальній напрузі. Першим кроком вирішення цієї задачі є розрахунок картини електричного поля і покращення екранних систем, передбачуваної конструкції вводу. Досвід розрахунків і експериментів показує, що при розробці звичайної конструкції «елегаз-повітря», особливу увагу слід виділити, по-перше - внутрішньому екрану, який розташований на потенціалі землі, і, по-друге - зовнішньому екрану, який розташований на високому потенціалі. Внутрішній екран повинен забезпечувати, з однієї сторони, це електричну міцність проміжку «струмоведучий стрижень - заземлений фланець ізолятора», а з іншої сторони край цього екрану має визначати величину тангенціальної складової напруженості поля на поверхні ізолятору, від якої залежить поява ковзного розряду. Максимальне значення напруженості електричного поля досягає, як правило, на поверхні струмоведучого стрижня в зоні розташування заземленого екрану і на радіусних переходах краю цього екрану. Саме до цих поверхонь висуваються підвищені вимоги по якості обробки. В таких випадках мова йде про



полірування цих поверхонь. Зовнішній екран, який встановлений на фланці покришки, знаходиться під високим потенціалом, і має забезпечити відсутність зовнішньої корони на цьому фланці і на елементах струмопідводу від лінії. Оскільки екран знаходиться на відкритому повітрі, то пред'явлення підвищених вимог до чистоти обробки його поверхні немає сенсу. Як правило, такі екрани виготовляються штампованими із тонкого алюмінієвого листа без всякої механічної обробки. В даному випадку низьке значення напруженості електричного поля на ньому досягається тільки за рахунок малої кривизни його поверхні. На рисунку 1.11 приведені елементи розрахункової моделі вводу «повітря-елегаз», з вказаними розрахунковими епюрами розподілення напруженості електричного поля вздовж поверхонь у відносних одиницях[1].

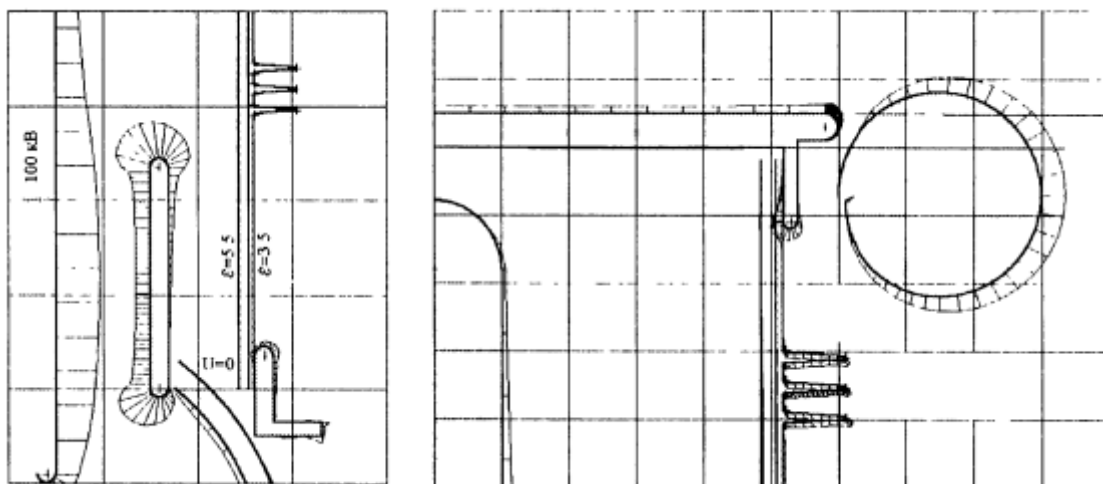


Рис. 1.11. Епюри розподілення напруженості поля на внутрішньому і зовнішньому екранах вводу

Після проведення всіх розрахунків і оптимізації екранної системи потрібно приступати до більш конкретизованого вибору покришки вводу. При цьому слід керуватися, по-перше - це необхідністю забезпечення потрібної питомої довжини шляху витоку, а по-друге – це вимогам по мінімально допустимій розрядній відстані по повітрю між металічними фланцями, які знаходяться під різними потенціалами[1].

Один з цих факторів є впливовим на визначення висоти покриття вводу. Крім того, з метою зниження ціни вимикача в цілому бажано вибирати ізолятор із ряду вже виготовлених тієї чи іншої форми. В вимикачі ВГБУ-110-40/2000 У1 використаний полімерний ізолятор виробництва або швейцарської, або німецької фірм. Вдала розробка конструкції вводу, заснована на правильному розрахунку, дала можливість провести випробування ВГБ-110 та ВГБУ-110 за нормами для вимикачів з посиленням рівнем ізоляції[1].

Істотною перевагою цих вимикачів є той факт, що нижня межа тиску елегазу при плюс 20 градусах Цельсія, за якого в повній мірі зберігається комутаційна здатність і номінальний рівень ізоляції, має настільки низьке значення, що при зниженні температури аж до мінус 45 градусів по Цельсію не відбувається викликане зменшення щільності елегазу нижче мінімально допустимої величини. Це значить, що при використанні розглянутих вимикачів і в умовах помірного клімату немає потреби передбачати який небудь підігрів елегазу[1].

Система контролю щільності елегазу, яка застосовується як в розглянутих вимикачах на 110 кВ, так і в решті вимикачів цієї серії, заснована на використанні аналогових стрілочних вимірів тиску з температурною компенсацією - щільномір. Принцип дії цих пристроїв подібний принципу дії звичайних манометрів з тією різницею, що в передаточний механізм, який зв'язує пружину Бурдона із стрілкою, встановлений калібрований біметалічний елемент. Цей елемент компенсує переміщення пружини Бурдона, яке викликане зміною тиску, що визначається виміром температури. Таким чином, при будь-якій температурі, прилад буде показувати величину тиску, приведену до 20 градусів Цельсія. Іншими словами, він буде контролювати щільність газу. Щільномір забезпечений низьковольтними контактами, зв'язаними з механічною системою та замикаючими або розмикаючими при заданих значеннях щільності. Ці контакти застосовуються в колах попереджувальної та аварійної сигналізації підстанції, а також для блокування

роботи вимикача під час зниження щільності елегазу нижче допустимої величини[1].

Крім описаних вище щільномірів, можуть використовуватися більш дорогі електронні пристрої контролю щільності елегазу. Первинні датчики таких пристроїв створюють неперервні електричні сигнали, пропорційно тиску та температурі газу. Потім ці сигнали обробляються в спеціальному блоці по заданому алгоритму, в систему видається сигнал, пропорційний щільності елегазу[1].

Наступним в серії став вимикач ВГБУ-220-40/2000 У1, прототипом для якого став вимикач ВГБУ-110-40/2000 У1. На рисунку 1.12 зображений зовнішній вигляд ВГБУ-220-40/2000 У1[1].



Рис. 1.12. Зовнішній вигляд ВГБУ-220-40/2000 У1

Цей апарат і його прототип, має трифазне управління, гідравлічний привод, полімерні покриття вводів «повітря-елегаз», чотири вбудованих трансформатори струму на кожну фазу, які можна демонтувати без розгерметизації вимикача, і забезпечений однорозривним дугогасним пристроєм автокомпресійного типу із зміненою контактною і дуттєвою системою. Основною конструктивною відмінністю його від ВГБУ-110 (не

беручи до уваги габарити) є те, що всі три фази відділені одна від одної по газу, чим і обґрунтовується наявність мембранного запобіжного пристрою на резервуарі кожної фази. При цьому, передаточний механізм, як і в минулому випадку, повністю знаходиться в середовищі елегазу. Крім того, номінальний тиск елегазу трішки вище, ніж в ВГБУ-110, в зв'язку з чим виникла потреба введення підігріву дугогасних пристроїв з ціллю запобігання зниження тиску елегазу при низьких значеннях температури навколишнього середовища[1].

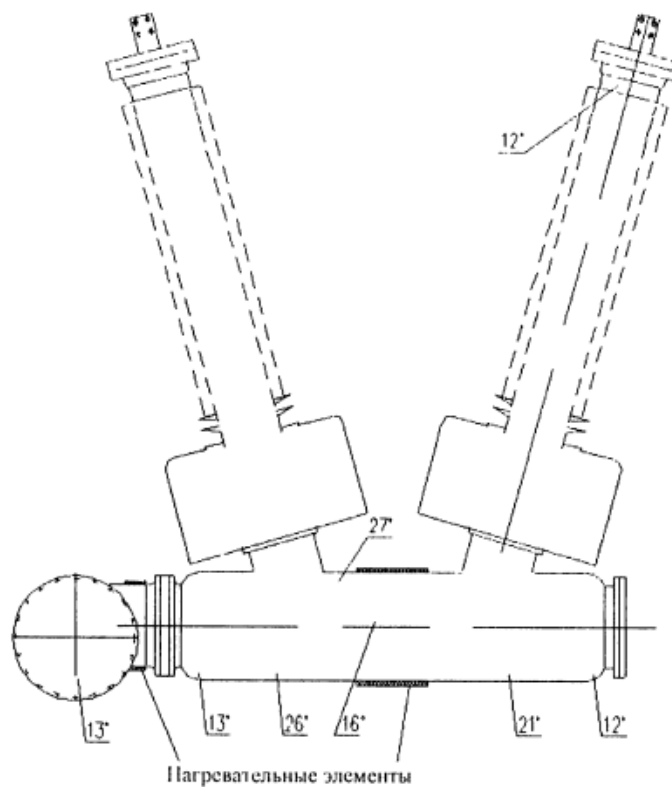


Рисунок 1.13. Результати теплових випробувань ВГБУ-220

З цією метою були використанні стрічкові нагрівальні елементи, які розташовуються на окремих ділянках зовнішньої поверхні резервуарів вимикача та покриті спеціальним теплоізолюючим матеріалом. Ці нагрівальні елементи вмикаються і вимикаються при певній температурі і повністю забезпечують роботу вимикача аж до мінус 45 градусів по Цельсію. Потрібна потужність нагрівальних елементів і характеристики теплоізоляційної системи були розраховані, а потім відредаговані в процесі теплових випробувань дослідного зразка ВГБУ-220. На рисунку 1.13 показані фінальні

результати цих випробувань - на схематичному зображенні полюсу вимикача вказані перевищення температури над температурою навколишнього середовища[1].

Наступні досліді показали, що при певному збільшенні потужності нагрівальних пристроїв і підвищенні теплоізоляції ВГБУ-220 стає придатним для використання в районах з холодним кліматом, тобто при температурі до мінус 60 градусів по Цельсію[1].

В деяких випадках з особливими вимогами замовника розробляються вимикачі, які значно відрізняються від серійної випускаючої продукції[1].

Яскравим прикладом цьому можна віднести вимикач ВГБП-220-40/2000 У1. Його зовнішній вигляд показаний на рисунку 1.14.

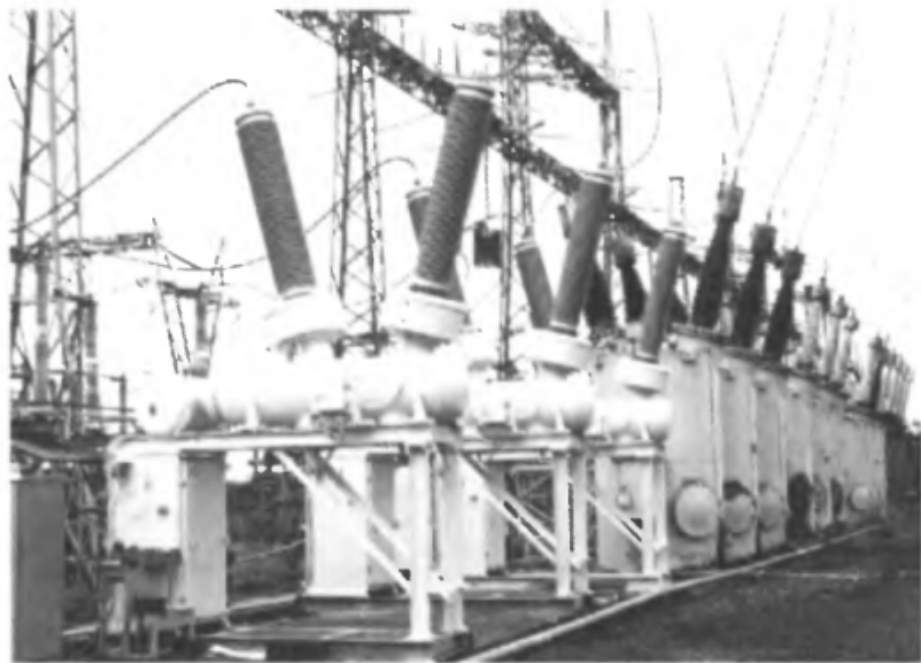


Рисунок 1.14. Зовнішній вигляд ВГБП-220-40/2000

Цей апарат з фазним управлінням та зі спеціально розробленими пневматичними приводами, встановленими на кожній фазі. Цей вимикач також забезпечений полімерними покриттями і вбудованими трансформаторами струму ( по чотири на кожний полюс) [1].

На рисунку 1.15 зображений полюс вимикача ВГБ-330-40/3150 У1, розробка якого є наступним етапом розвитку серії елегазових бакових вимикачів[1].

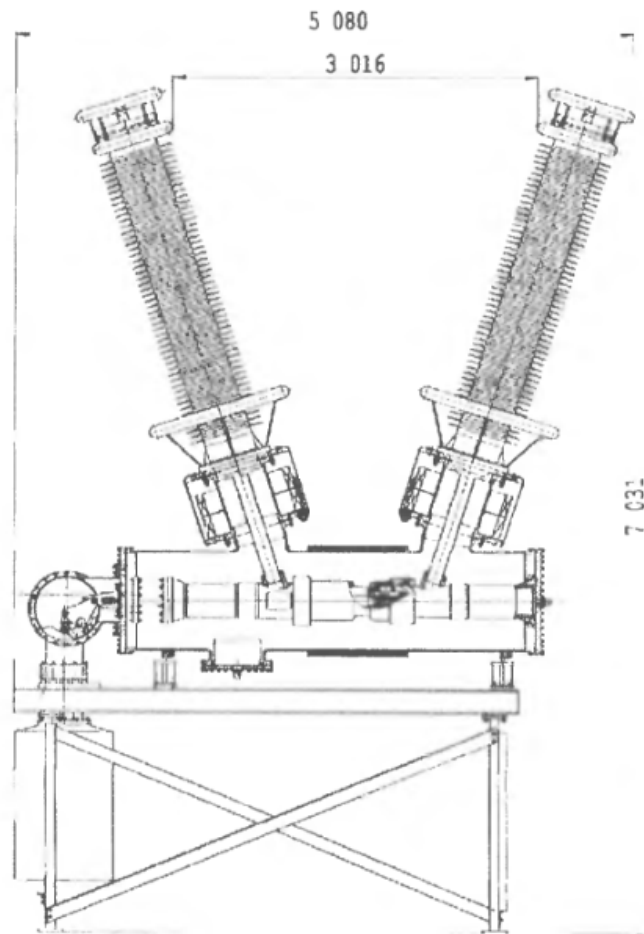


Рисунок 1.15. Полюс вимикача ВГБ-330-40/3150 У1

До складу кожного полюсу даного апарату входить однорозривний автокомпресійний дугогасний пристрій з нагрівальними елементами, гідравлічний привод з передаточним механізмом, чотири або більше трансформаторів струму, полімерні вводи «повітря-елегаз». Головною відмінністю цього апарату від, наприклад, ВГБУ-220 є те, що це вимикач з фазним управлінням. Крім того, в ньому значно зміненні контактна і система дуття в дугогасильному пристрої, а також є необхідність у встановленні зовнішніх екранів на вводах. На рисунку 1.16 зображено дугогасний пристрій

ВГБ-330-40-3150 У1, причому верхня половина дугогасної камери показана у ввімкненому положенні, а нижня у відключеному[1].

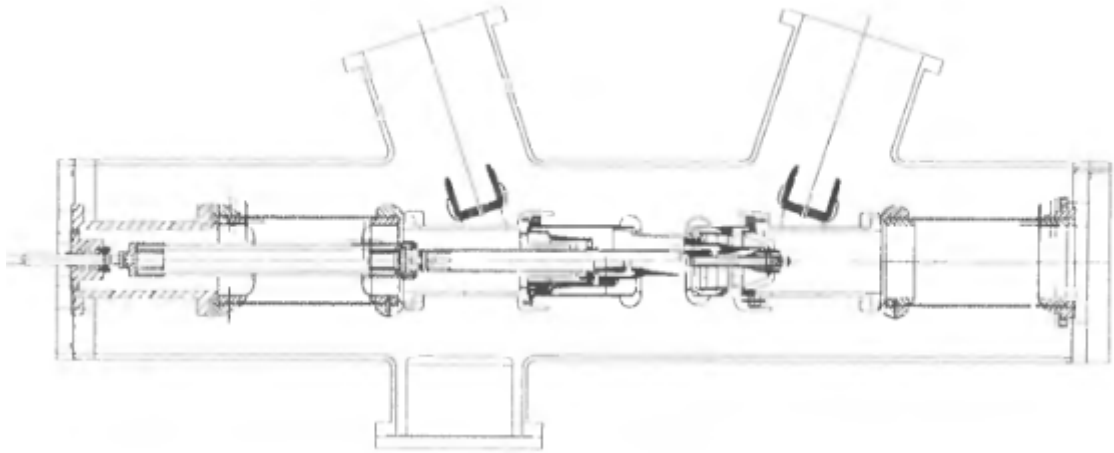


Рисунок 1.16. Дугогасний пристрій вимикача ВГБ-330-40/3150 У1

На прикладі розробленої для ВГБ-330-40/3150 У1 дугогасної камери були створені вимикачі с дворозривним гасильним пристроєм на 330 кВ з номінальними струмами відключення 50 і 63 кА[1].

На рисунку 1.17 зображений полюс вимикача ВГБ-500-40/3150 У1.

Даний вимикач з дворозривним автокомпресійним дугогасним пристроєм, з вбудованими трансформаторами струму, полімерними вводами «повітря-елегаз», пофазним управлінням. Для вирівнювання розподілу напруженості між розривами кожної ступені всередині дугогасного пристрою встановлені подільні конденсатори великої ємності ( близько 1000 пФ), які шунтують кожний розрив[1].

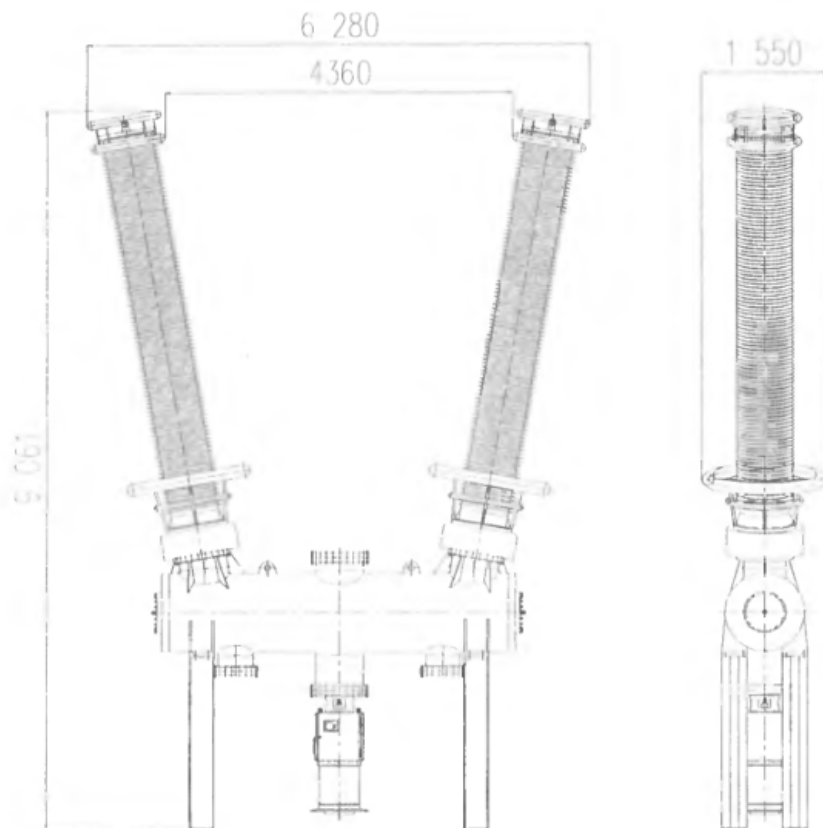


Рисунок 1.17. Полюс вимикача ВГБ-500-40/3150 У1

Завершує серію елегазових бакових вимикачів ВГБ-750-50/4000 У1 зображений на рисунку 1.18. Він побудований на прикладі розробленого раніше для КРУЕ-800 кВ[1].

Даний вимикач з дворозривним автокомпресійним дугогасним пристроєм, має в собі вбудовані трансформатори струми, полімерні вводи. Кожний розрив полюса управляється окремим гідравлічним приводом, тобто кожний полюс забезпечений двома приводами. Ця міра дозволила досягти того, що даний вимикач при таких високих номінальних параметрах є двоперіодним, іншими словами, повний час відключення не перевищує тривалості двох періодів струму промислової частоти (40 мс для 50 Гц). Для покращення надійності спрацювання, управляючі електромагніти приводів одного полюсу з'єднанні послідовно. Крім того, для виключення здатності неповнофазного спрацювання розроблена система гідравлічного зв'язку приводів одного полюсу[1].



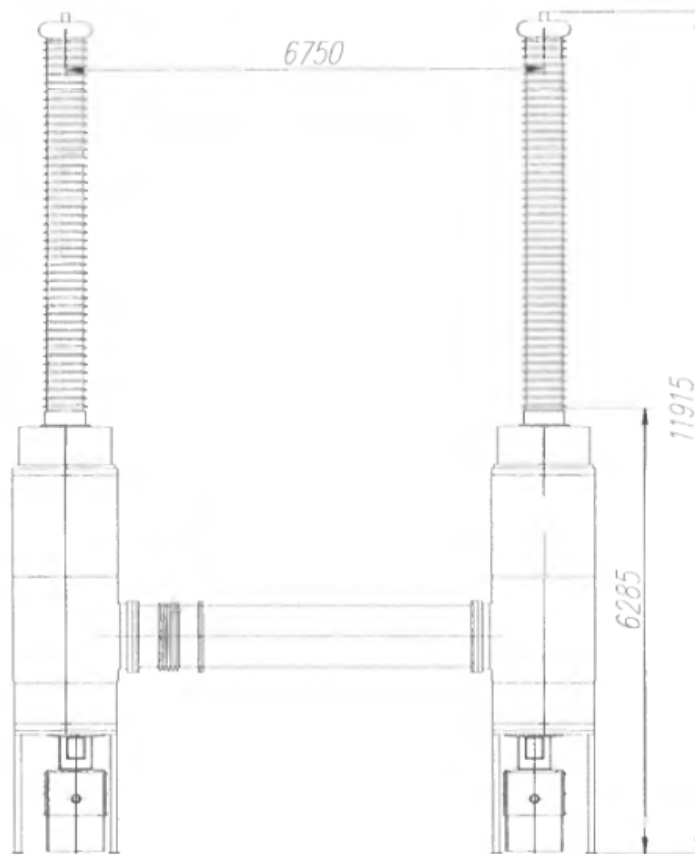


Рисунок 1.18. Вимикач ВГБ-750-50/4000 У1

На рисунку 1.19 зображений розріз дугогасного пристрою одного напівполюсу[1].

Як відомо, на підстанціях виконуються спеціальні міри по обмеженню комутаційних перенапруг, але в деяких випадках потрібні додаткові міри по зниженню перенапруг. В подібних ситуаціях, вимикач може бути забезпечений передвмикаючими резисторами. Рухомий контакт цих резисторів механічно зв'язаний з рухомою системою дугогасного пристрою[1].

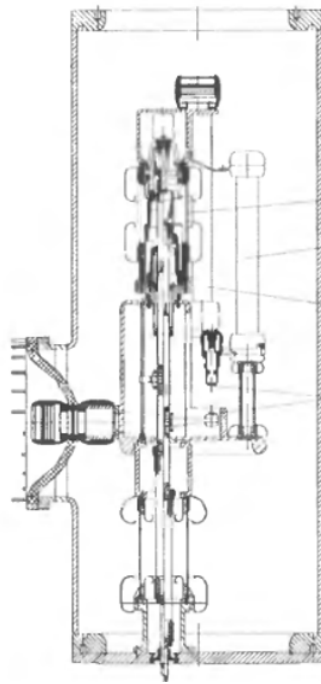


Рисунок 1.19. Дугогасний пристрій напівполюсу ВГБ-750

У ввімкненому положенні вимикача, резистори зашунтовані головними контактами. При відключенні першими розмикаються контакти резисторів, потім головні і наступними дугогасні контакти. Таким чином, при відключенні, струм по резисторам не протікає. При ввімкненні першими замикаються контакти резисторів, потім дугогасні контакти та головні. Контактів передвмикаючих резисторів надана спеціальна форма, яка забезпечує попередній пробій міжконтактного проміжку при ввімкненні саме на цих контактах. Для вирівнювання розподілу напруги, кожний розрив шунтований конденсаторами ємністю 2000 пФ[1].

З розглянутих конструкцій елегазових вимикачів виходить, що вводи типу «повітря-елегаз» мають виконання, в якому електрична міцність як в радіальному напрямку, так і в аксіальному напрямку забезпечується, в більшості, за рахунок ізоляційних властивостей елегазу[1].

### **Висновки до першого розділу.**

Проведений огляд високовольних еталонних конденсаторів, а саме детально розглянуті конденсатори зі стисненим газом та їх використання.

Проведено ознайомлення з вимогами, що пред'являються до конденсаторів, наповнених стисненим газом, та розглянуті конструкції конденсаторів ІОГ – 250, ІОГ –350, ІОГ – 450. Розглянуті вимоги до конденсаторів з випробувальною напругою до 1000кВ. Виконаний огляд високовольної елегазової апаратури та випробувальних трансформаторів з елегазовою ізоляцією.

## **2. ВИСОКОВОЛЬТНА ЕЛЕГАЗОВА ІЗОЛЯЦІЯ**

### **2.1. Елегаз – середовище для електротехнічного обладнання**

Найбільш застосовуваним ізоляційним, дугогасильним і охолоджувальним середовищем, які використовують в електротехнічному обладнанні, є мінеральне масло і повітря. Гази в порівнянні з маслом і твердими ізоляційними матеріалами мають певні переваги, головні з яких – це мала провідність і практично відсутність діелектричних втрат, незалежність в однорідному полі електричної міцності від частоти, невелика забрудненість під дією дуги і корони[2].

Електрична міцність газової ізоляції в однорідних або слабо неоднорідних полях підвищується із збільшенням тиску та при деяких умовах може перевищити електричну міцність трансформаторного фарфору, масла і високого вакууму[2].

Для спрощення конструкції обладнання з газовою ізоляцією бажано, щоб потрібна електрична міцність була забезпечена при порівняно невеликому підвищеному тиску[2].

Але при використанні газу в електротехнічному обладнанні, окрім ізоляційних, необхідно взяти до уваги і другі функції газу, а саме: сам газ і продукти його розпаду не повинні бути токсичними. Газ повинен бути хімічно нейтральним по відношенню до застосованих в пристрої матеріалів. Газ повинен мати невисоку температуру скраплення, щоб його можна було використовувати при підвищених тисках і по вимогам експлуатації температурах. Він повинен мати хорошу тепловідвідну властивість. Дисоціація газу повинна бути малою. Газ повинен бути пожежобезпечним та вибухобезпечним[2].

Єдиним газом, який найбільше задовольняє потреби, являється елегаз. Чистий газоподібний елегаз повністю безпечний, хімічно не активний, тому в стандартних експлуатаційних умовах він не діє ні на які матеріали, що застосовуються в апаратобудуванні, має збільшену тепловідвідність і є дуже

чудовим дугогасильним середовищем, дозволяючи виконувати відключення дуже великих струмів при великих швидкостях відновлення напруги. В однорідному полі електрична міцність елегазу в 2,3 – 2,5 раз більша за міцність повітря[2].

Низькі температури скраплювання та сублімації дають можливість при стандартних умовах застосовувати елегазові апарати без спеціального підігріву. Елегаз не горить і не підтримує горіння, з цього слідує, що елегазові апарати являються вибухо- та пожежобезпечними[2].

## **2.2. Електрична міцність елегазу**

Техніко-економічні показники обладнання, в якому у якості ізоляції застосовується елегаз, в більшості залежать від того, наскільки високою може бути вибрана робоча напруженість електричного поля на поверхні даних елементів, які знаходяться під дією високої напруженості. Виявлення основних закономірностей, які зв'язуються ізоляційними характеристиками стиснених газів з параметрами газу і розрядного проміжку, а також станом останнього, дає можливість виявити процеси розряду слідом зміни форми і стану поверхні електродів, відстані між ними, тиску газу і ступінь його чистоти. Усестороннє врахування факторів, які визначають процеси розряду в елегазі, дає можливість вибрати оптимальні параметри обладнання[2].

## **2.3. Пробій проміжків з однорідним електричним полем**

В проміжках з однорідним або квазіоднорідним електричним полем (при відсутності локальних неоднорідностей) розряд стається в стримерній формі, причому умовою розряду являється рівність  $N_k = N$ . В однорідних полях по всьому проміжку  $E = \text{const}$  і  $x_k = S$ . Тоді рівняння має таку форму:

$$\ln N = k \cdot (E - (E/p)_k) \cdot S \quad (1)$$

Вважаючи, що в ньому  $N_k = N = 10^8$ , одержимо вираз для відносно прибивної напруженості  $E_{\text{пр/р}}$  в однорідному полі:

$$U_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}}}{p} = \frac{\ln N_k}{S \cdot k \cdot p} + \left(\frac{E}{p}\right)_k * p * S \quad (2)$$

Порівняння залежностей  $\frac{E_{\text{пр}}}{p} = f(pS)$  для елегазу і повітря, вирахованих по рівнянню 2, наведено на рисунку 2.1.

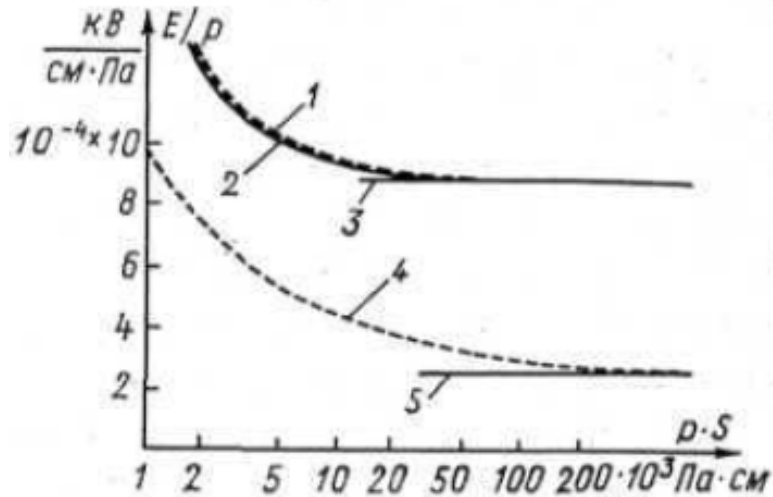


Рисунок 2.1. Криві пробивної напруженості для елегазу і повітря в залежності від  $p \cdot S$ [2].

Через дуже велике значення коефіцієнту  $k$  для елегазу перший член в рівнянні 2 уже при невеликих значеннях добутку  $p \cdot S$  стає дуже малим. Так, при  $p \cdot S = 0,5 * 10^5$  він становить всього 1,5% від значення  $\left(\frac{E}{p}\right)_k = 8,9 * 10^{-4} \text{ кВ/см} \cdot \text{Па}$ . В повітрі вплив першого члену перестає проявляти себе на величині  $\left(\frac{E}{p}\right)_k$  при значенні добутку  $p \cdot S$  на порядок більше[2].

В реальних конструкціях електричних апаратів, як правило  $p \cdot S \gg 0,5 * 10^5$ . Тому для практичних розрахунків пробивної напруги в однорідному полі можна використовувати рівняння:

$$U_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}}}{p} * p * S = 8,9 * 10^{-4} * p * S \quad (3)$$

Слідє відмітити, що  $\frac{E_{\text{пр}}}{p} * p * S = 8,9 * 10^{-4} * p * S$  – це теоретично одержане значення, важко досягне в реальних високовольтних конструкціях.

В реальних умовах числове значення відносної пробивної напруженості  $\frac{E_{\text{пр}}}{p}$

завжди менше  $\left(\frac{E}{p}\right)_k$  внаслідок впливу локальних неоднорідностей електричного поля[2].

## 2.4. Вплив неоднорідності електричного поля

Важливою і тяжкою задачею при розробці приладів високої напруги з газовою ізоляцією є правильне використання інформації, отриманої при експериментах, в реальних конструкціях. Умови експерименту не завжди точно відповідають тому, які утворюються в процесі проектування високовольтної установки. Дуже важко виявити цю різницю, а ще важче дати оцінку їх впливу, так як різні фактори, які дозволяють визначити електричну міцність, часто тісно зв'язані між собою, створюючи додаткові впливи[2].

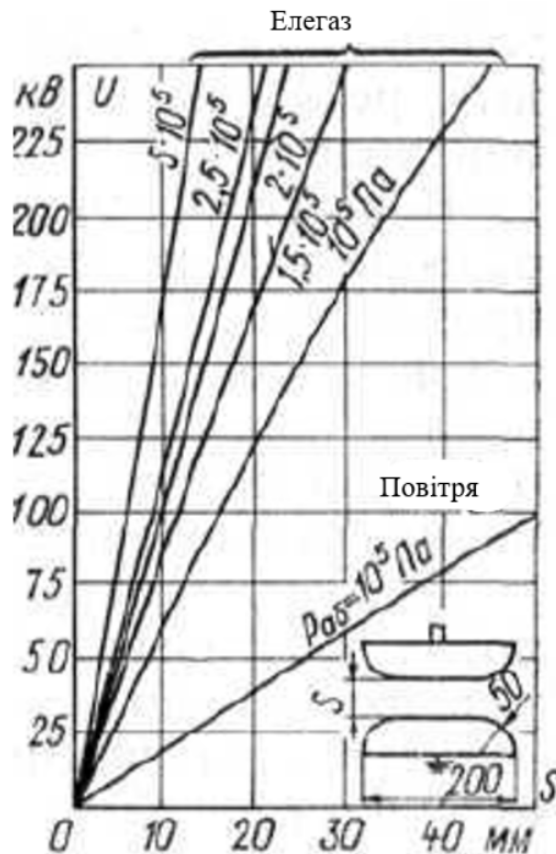


Рисунок 2.2. Криві пробивної напруги в залежності від відстані між електродами та тиском

На рисунку 2.2 показано результати експерименту електричної міцності елегазу при промисловій частоті в залежності від відстані між електродами і

тиску. Алюмінієві електроди, розміри і конструкція яких зображена на рисунку, забезпечували порівняно однорідне електричне поле. Також проведена крива залежності міцності від відстані у повітрі при атмосферному тиску. Порівняння відповідних кривих показує, що пробивна напруга елегазу в однорідному полі при атмосферному тиску, як і варто було очікувати, в три рази вище, ніж у повітрі. При цьому середня пробивна напруженість в елегазі становить 59 кВ/см, а в повітрі 20 кВ/см[2].

У відповідності з законом подібності в однорідних та слабо неоднорідних полях при незмінній температурі розрядна напруга є функцією добутку тиску на відстань між електродами, якщо відношення основних розмірів, визначаючих конфігурацію електричного поля, залишається незмінним[2].

Якщо умова геометричної подібності не виконується тоді можна побачити відхилення від співвідношення  $U=f(p \cdot S)$ . Відхилення від закону подібності збільшується по мірі зменшення однорідності поля. Для кожного тиску з'являється своя крива, причому видно значне взаємне зміщення кривих. При тиску  $5 \cdot 10^5$  Па міцність проміжку в елегазі лише в 2 рази перевищує міцність у повітрі[2].

Зниження відносної міцності елегазу у порівнянні з повітрям при підвищенні тиску, мабуть, зв'язано з переходом розряду від лавинної форми до стримерної. В області дії закону подібності пробій відбувається в лавинній формі, а в області, де закон не виконується – в стримерній. Критичний тиск  $P_k$ , при якому ще виконується закон подібності, можна вирахувати по формулі:

$$P_k M = 110 \cdot 10^5 \quad (4)$$

де  $M$  – молекулярна маса газу.

Використовуючи для повітря  $M = 29$ , одержимо  $P_k = 3,8 \cdot 10^5$  Па. Молекулярна маса елегазу  $M = 146,06$ ,  $P_k = 0,75 \cdot 10^5$  Па. При тисках вище критичного ріст пробивної напруги із зростом тиску буде зменшуватись. Зниження росту електричної міцності елегазу починається відносно раніше



ніж у повітрі, що і призводить до пониження відносної електричної міцності[2].

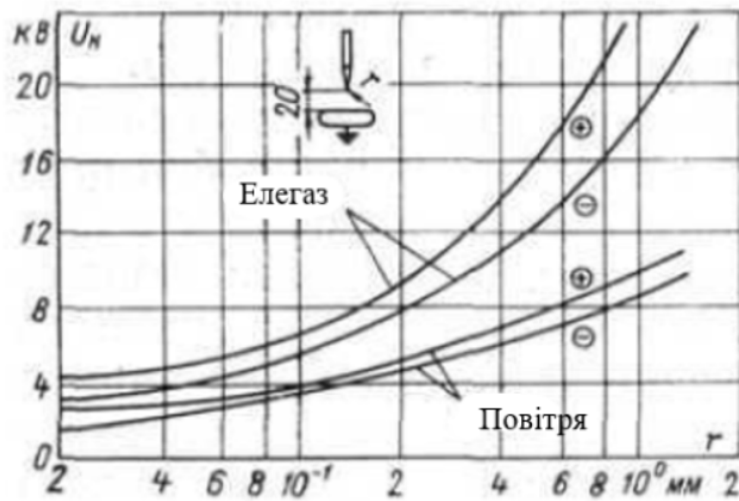


Рисунок 2.3. Криві початкової напруги елегазу і повітря в залежності від радіуса закруглення електрода при атмосферних тисках

На рисунку 2.3 наведені криві початкової напруги елегазу і повітря в залежності від радіуса закруглення електрода при атмосферних тисках. Рисунок показує, що як в елегазі, так і в повітрі початкова напруженість корони росте при збільшенні радіуса кривизни електрода, причому в елегазі росте швидше[2].

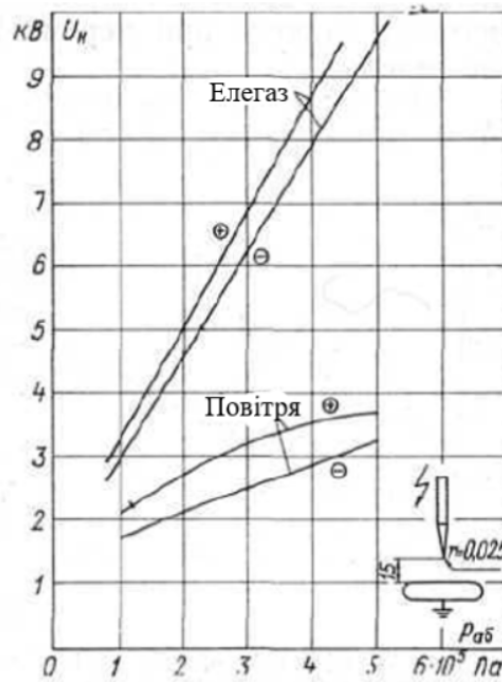


Рисунок 2.4. Криві залежності початкової напруги від тиску газу

Аналогічною є картина рис. 2.4. з якої видно, що при збільшенні тиску: в елегазі початкова напруга росте значно швидше ніж у повітрі[2].

## 2.5. Пробивна напруга проміжків з неоднорідними електричними полями

Стример, з великою ймовірністю, який збуджує пробій в елегазі, не завжди виникає в неоднорідному полі. В різконеоднорідному полі він породжується у корону, при цьому внаслідок коронної стабілізації розряду, пробивна напруга значно більше напруги  $U_n$ . Таким шляхом, в різко неоднорідному полі умова виникнення стримеру відповідає не умові пробою, а умові виникнення корони. Умовам пробою відповідають інші критерії.

Вираз для пробивної напруги проміжку в елегазі з неоднорідним електричним полем можна отримати, виходячи з наступних міркувань. Представимо, що до електроду, який створює різко неоднорідне поле, прикладена напруга, яка на вершині електроду створює електричне поле  $E_m/r$ , що трішки перевищує значення  $(E/r)_k$ . Внаслідок великого значення

коефіцієнту  $k$  в елегазі критичне число електронів  $N_k$ , при якому виникає стример, відбувається вже на дуже невеликій відстані  $x_k$  від вістря. Тому максимальна напруженість на вершині електроду з різкою неоднорідністю поля відіграє найголовнішу роль в формуванні розряду в елегазі. Таким чином, значення пробивної напруги в елегазі обумовлюється розподіленням електричного поля в безпосередній близькості від електроду з найбільшою неоднорідністю поля. Воно описується наступним виразом:

$$E = \frac{R^2 \cdot E_M}{(R+x)^2}, \quad (5)$$

$R$ -радіус сферичного електроду або еквівалентний радіус несферичного, який визначається з наступного виразу:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

в якому  $R_1, R_2$  – радіуси закруглення вершини реального електроду у взаємно перпендикулярних площин[2].

Розряд виникне лише у тому випадку, якщо на відстані в напрямку поля від вершини електроду  $x=x_k$  відносна напруженість  $E/p$  від значення  $E_M/p$  знижується до значення, не меншого, ніж  $(E/p)_k$ . Відповідно, критична відстань  $x_k$  може бути визначена шляхом підстановки в останній вираз значення  $E$ , знайденого з критеріальної рівності:

$$E/p = (E/p)_k \quad (6)$$

Таким чином,

$$x_k = R \cdot \left[ \sqrt{\frac{E_M}{(E/p)_k \cdot p}} - 1 \right]. \quad (7)$$

Підставляючи (5) і (7) в (1)

$$\ln N_k = \ln 10^8 = k \cdot R \cdot \left[ \sqrt{E_M} - \sqrt{(E/p)_k \cdot p} \right]^2 \quad (8)$$

Після перетворень цього виразу отримаємо вираз для відносного значення максимальної пробивної напруженості електричного поля

$$E_{M.pr}/p = (E/p)_k \cdot \left( 1 + \frac{a}{\sqrt{R \cdot p}} \right), \quad (9)$$

де

$$\alpha = \sqrt{\frac{4 \cdot \ln N_k}{k \cdot (E/p)_k}} = 55.4 (\text{Па} \cdot \text{см})^{0.5}. \quad (10)$$

Електричне поле можна охарактеризувати коефіцієнтом використання системи електродів  $\beta = E_{\text{ср}}/E_{\text{м}}$ . Використовуючи цей коефіцієнт, можна записати:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{ср.пр}} S = E_{\text{м.пр}} \beta S \quad (11)$$

Після підстановки значення  $E_{\text{м.пр}}$  з (9) отримаємо

$$U_{\text{пр}} = (E/p)_k \cdot \left(1 + \frac{a}{\sqrt{Rp}}\right) p \beta S. \quad (12)$$

Очевидно, що член  $\frac{a}{\sqrt{Rp}}$  в рівняннях (9) та (11) може грати роль тільки при низьких тисках і малих радіусах кривизни електроду. Наприклад, при  $Rp = 10^5 \text{Па} \cdot \text{см}$ , цей член складає 18%. При великих значеннях  $Rp$ , тобто в реальних умовах, цим членом можна знехтувати. Тоді з (9) слідує, що  $E_{\text{м.пр}}/p = (E/p)_k$ , тому теоретичне значення пробивної напруги може бути розраховано по формулі:

$$U_{\text{пр}} = (E/p)_k p \beta S \quad (13)$$

В останній формулі добуток  $(E/p)_k p = 89 \cdot 10^5 p = E_T$  представляє собою теоретичне значення пробивної напруженості в елегазі. Воно отримане в припущенні, що поверхні електродів є ідеально гладкими, для яких пробивна напруженість не залежить від форми прикладеної напруги[2].

## 2.6. Електрична міцність сумішей елегазу з іншими газами

В деяких випадках, а саме коли газ використовується тільки в якості ізоляційного і охолоджуючого середовища, може виявитися, що доцільно використовувати не чистий газ, а його суміш з іншими. Використання суміші має сенс, по-перше, при необхідності зменшити границю робочих температур газонаповненого обладнання. При змішуванні елегазу, наприклад, з азотом, який має дуже невелику температуру скраплення, допустима робоча

температура суміші дещо зменшується. По-друге, завдяки великому значенню кутового коефіцієнту  $\operatorname{tg}\delta$ , чистий елегаз надзвичайно чутливий до мікронерівностей на поверхні електродів, що визиває немалі технологічні труднощі при виготовленні апаратів. Суміш елегазу, наприклад з азотом, зменшить чутливість газової ізоляції до таких мікронерівностей, що дозволить уникнути деяких неприємностей. По-третє, в різко неоднорідних полях при критичному тиску  $p_c$  ми можемо спостерігати спад пробивної напруги. В сумішах, область пониженої електричної міцності може переміститись за межі робочого тиску. Для цього парціальний тиск азоту слід обирати таким чином, при якому область максимуму кривої його міцності співпадає з областю мінімуму для елегазу[2].

Понижений тиск елегазу, бажаний для забезпечення роботи апарату, не маючого системи підігріву, в умовах, близьких до арктичних. Також вказуються і інші причини використання і досліду сумішей різних газів. Так, наприклад, значна кількість повітря, в межах до 25%, дуже слабо впливає на електричну міцність проміжку. Додавання до повітря 2-3% елегазу значно підвищує розрядну напругу[2].

## **2.7. Вплив різних факторів на електричну міцність газового проміжку**

У елегазових апаратах різними технічними засобами, зокрема застосуванням екранів, забезпечуються електричні поля, близькі до однорідного. Однак технологічні дефекти (недостатньо чиста обробка, зварні шви, забруднення, особливо металеві частинки на поверхні електродів і в газі) створюють «слабкі місця» - локальні неоднорідності, які змінюють розподілення напруженості поля на відрізьку, де розвиваються критичні лавини[2].

Ці мікронерівності і створені ними локальні неоднорідності електричного поля по-різному впливають на електричну міцність при різних формах діючої напруги. Таким чином, в реальних конструкціях, по-перше,

$E_{пр} < E_t$  і, отже,

$$U_{пр} = E_{пр} \beta S; \quad (14)$$

по-друге, пробивна напруженість  $E_{пр}$  буде різною для різних форм діючої напруги[2].

Як видно з рис. 2.5, елегаз більш чутливий в порівнянні з повітрям до таких локальних неоднорідностей. Тому при розробці та виготовленні елегазових апаратів особливо необхідно враховувати вплив усіх факторів, що призводять до посилення неоднорідності електричного поля, і вживати заходів до ослаблення їх впливу[2].

Великий вплив на електричну міцність проміжків надають мікронеоднорідності на поверхні електродів, що виникли або в результаті недостатньо чистої обробки, або внаслідок попадання на поверхню твердих (зокрема, металевих) частинок. Найбільш сильне зниження розрядної напруги внаслідок впливу мікронеоднорідності має місце при промисловій частоті[2].

Експериментально встановлено, що розрядна напруга знижується в тому випадку, якщо виступи в найбільш напруженій частині поверхні електродів мають висоту, більшу 0,4 мкм, при цьому сусідні виступи екранують один одного, внаслідок чого найбільша напруженість на них знижується. Однак на поверхні завжди є найбільший виступ, який і визначає розрядну напругу проміжку[2].

Представивши виступ у вигляді циліндра висотою  $h$  ( $h \ll S$ ) зі сферичною голівкою радіуса  $r$ , можна вважати, що створення розряду можливо тільки в області посиленого поля, тобто у вершини виступу. Головне поле, таким чином, можна не враховувати. Тоді умову виникнення розряду можна записати в наступному вигляді:

$$k \int_h^k \left[ \frac{E(x)}{p} - (E/p)_k \right] * p dx = \ln 10^8 = c \quad (15)$$

При  $x=x_k$   $E(x)/p = (E/p)_k$ .

Ввівши нову змінну  $x/h$ , отримаємо:

$$phk \int_h^{k/h} \left[ E\left(\frac{x}{h}\right)/p - (E/p)_k \right] * d\left(\frac{x}{h}\right) = c \quad (16)$$

З рівняння (16) випливає, що розрядна напруга є функцією похідної тиску елегазу і висоти виступу. Вплив похідної  $ph$  на початкову напруженість електричного поля показано на рис. 2.5. Р. Баумгартнер показав[3], що якщо крім макрополя враховувати і його мікроструктуру, то теоретичні значення  $U_{пр}$  і  $E_{пр}$  збігаються з експериментальними і виконується закон подібності[2].

Слід зазначити, що хоча криві, наведені на рис. 2.5, розраховані для системи електродів з однорідним полем, результат можна поширити і на систему з помірно неоднорідним полем, оскільки висота виступу  $h$  мала в порівнянні з мікроскопічною кривизною поверхні електродів[2].

Оскільки металічна частинка, що створює локальне посилення електричного поля на поверхні електрода, має той же заряд, що і електрод, то на неї діє сила, яка прагне притягнути її до протилежного електрода. Якщо ця частинка не пов'язана з електродом і має досить малу масу, то в сильному електричному полі вона не залишиться нерухомою. Якщо, частинка, що лежить на поверхні електрода, має напівсферичну форму радіусу  $R$ , то напруженість поля (В / м), необхідна для її підйому, дорівнює

$$E = 5.8 \cdot 10^5 \sqrt{R\gamma g} \quad (17)$$

де  $\gamma$  — густина,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

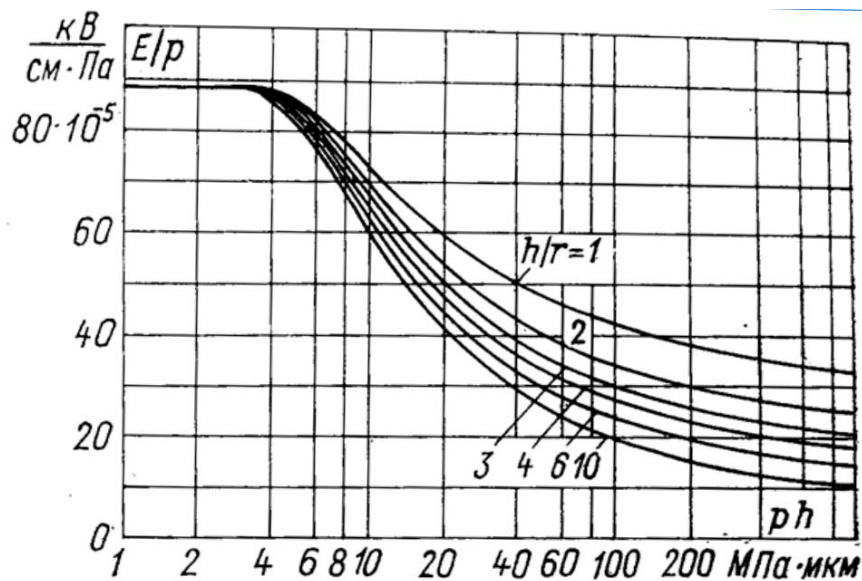


Рис. 2.5. Вплив на початкову напруженість електричного поля висоти виступу і тиску

Після відриву від електрода на частинку буде діяти ще й сила відштовхування, оскільки вона несе той же заряд, що і електрод. Сумарна сила, що діє на частинку в однорідному полі з напруженістю  $E_0$  після її відриву, дорівнює:

$$F = 12^{-1} * 10^{-9} E_0^2 R^2 \quad (18)$$

Під дією цієї сили частинка буде рухатися в проміжку між електродами. Відрив частинки неправильної форми (плоска, голчаста, ниткоподібна і т. д.) від електроду починається з повороту і орієнтації її в електричному полі[2].

При повороті частинки електричне поле на її вершині посилюється (рис. 2.6), внаслідок чого зростає і сила, що викликає такий поворот, оскільки вона пропорційна квадрату напруженості електричного поля. Слід відмітити, що для утримання частинки в нестійкому (зокрема, вертикальному) положенні на поверхні електрода потрібна значно менша прикладена напруга, ніж для початкового підняття або повороту частинки. Виникаючі таким чином «виступи» на напружених ділянках поверхні електродів знижують пробивну напругу проміжку[2].

Частинки з великим значенням відношення поверхні до маси не тільки легко орієнтуються в електричному полі. Вони не менш легко приходять в рух під дією електричного поля. Відрив частинки від електрода супроводжується іскровим розрядом внаслідок переривання струму зміщення. Електричне поле в безпосередній близькості від рухомої частинки спотворено, і тому напруженість збільшена. При наближенні зарядженої частинки до протилежно

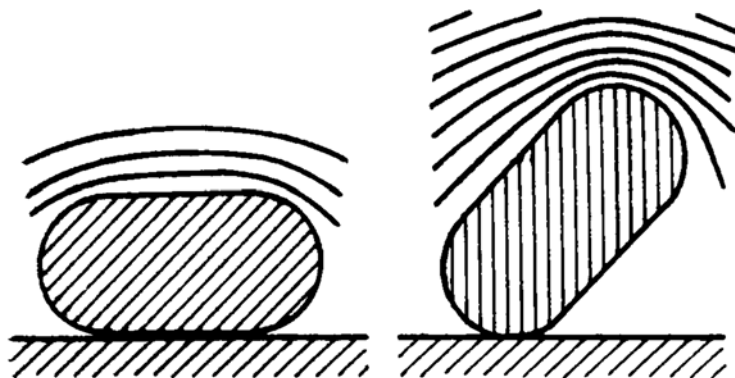


Рис. 2.6. Посилення електричного поля при повороті частки



зарядженого електроду між ними також відбувається іскровий розряд, частинка перезаряджається і починає рухатися в протилежному напрямку. При змінній напрузі частинка з невеликою масою буде чуйно реагувати на дію різних сил. Виникаючі при русі частинки часткові розряди також знижують пробивну напругу. З іншого боку, вимір часткових розрядів є ефективним методом виявлення сторонніх частинок або місцевих викривлень електричного поля. Рис. 2.7 показує вплив на пробивну напругу непов'язаних з електродом частинок з мідного дроту. З малюнка видно, що збільшення довжини дроту призводить до помітного зниження кривої пробивної напруги[2].

Оскільки сила, що діє на частинку помітною маси, залежить головним чином від діючого значення напруги електричного поля, напруга пробою проміжку, забрудненого такими частинками, визначається не скільки амплітудним, скільки діючим значенням. У цьому випадку пробивна напруга постійного струму рівна діючим значенням напруги змінного струму[2].

В реальних конструкціях елегазових апаратів найбільш небезпечна присутність частинок у вигляді стружки, які істотно знижують розрядну напругу. Піднімаючись, вони утворюють гострі електроди, спотворюючи електричне поле[2].

Негативний вплив виступів і металевих частинок істотно зменшується, якщо хоча б один з електродів має ізоляційне покриття. При цьому частинки вже не заряджаються, а лише поляризуються. Перенесення заряду вже неможливе. Рух частинок утруднено. При покритті внутрішнього електроду, що знаходиться під високим потенціалом, тонким шаром ізоляції з високою діелектричною проникністю, напруженість поля у виступі суттєво знижується. Покриття, таким чином, рівносильне збільшенню чистоти обробки електродів, причому може виявитися, що нанесення ізоляційного покриття обійдеться дешевше, ніж ретельна механічна обробка поверхні електродів. Ізоляційне покриття повинно мати гарну адгезію і мати рівну поверхню. В іншому

випадку розрядні напруженості можуть мати навіть менші значення, ніж у непокритих електродів[2].

У деяких роботах відзначається вплив на електричну міцність матеріалу електродів, яке посилюється в міру підвищення тиску. Одна з причин цього впливу полягає в наступному. При сильному збільшенні однаково оброблені поверхні з різних матеріалів мають різну мікрогеометрію. На поверхні м'яких матеріалів (алюміній, мідь) залишаються більш виступаючі і більш загострені мікровиступи, а також вдавнені і відшаровані частки металу. Під дією сил

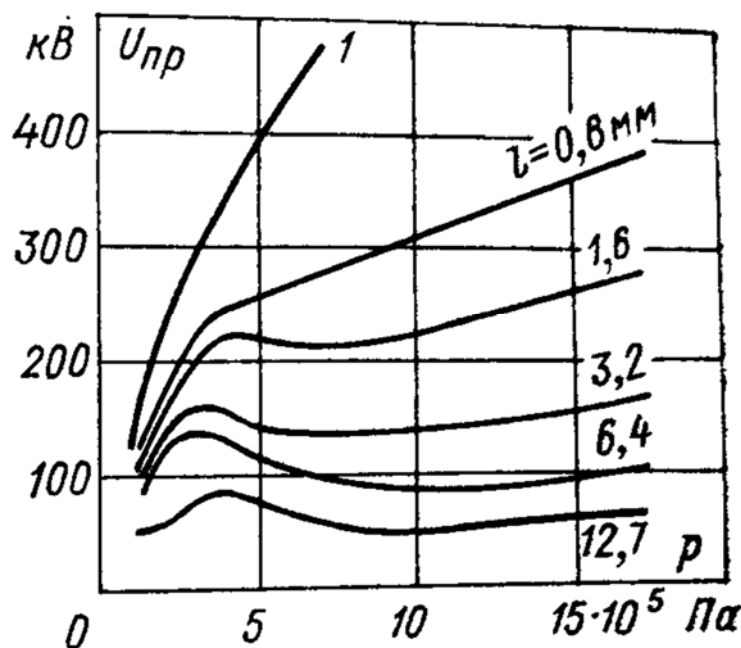


Рис. 2.7. Вплив на пробивну напругу промислової частоти (ефективне значення) вільних частинок з мідного дроту діаметром 0,4 мм різної довжини  
1 - частинки відсутні

електричного поля слабо пов'язані з електродами частинки можуть орієнтуватися в напрямку поля або навіть відриватися під його впливом і ініціювати пробій при низьких напругах. Цей же механізм є однією з причин відхилення від закону подібності. Однак навіть при ретельній підготовці експерименту і врахуванні мікрополя вплив матеріалу на  $U_{пр}$  не виявляється. Винятком є алюміній, поверхня якого вкрита окисною плівкою. Концентрація

зарядів на ній настільки сильно підвищує напруженість поля в товщі плівки, що виникає електронна емісія, яка полегшує формування розряду. Аналогічні явища виникають і при появі на електродах масляних плівок, жирових і потових плям і т. д.[2].

При обробці поверхні електродів (після попередньої механічної обробки) електричними розрядами пробивна напруга спочатку зростає, а потім, після деяких десятків розрядів, стабілізується. Причина цього полягає в тому, що обробка електродів малопотужними розрядами дозволяє усунути з їх поверхні слабо пов'язані з ними провідні частинки[2].

З вищесказаного випливає, що на пробивну напругу впливає багато факторів. Тому пробій газового проміжку необхідно розглядати як випадковий процес, описуваний статистичними методами. Таким чином, пробивна напруга  $U_{пр}$  або пробивна напруженість поля  $E_{пр}$  є випадковими величинами з невідомими, як правило, функціями розподілення. Експериментальне визначення виду цих функцій вимагає проведення дуже великого числа дослідів. Деякі із авторів відзначають, що іноді число вимірювань випадкової величини досягало 200 або навіть 500. Лише при такому великому числі незалежних вимірювань в результаті повної статистичної обробки даних на цифровій обчислювальній машині може бути отримана емпірична функція розподілення для  $U_{пр}$  або  $E_{пр}$  з високим ступенем ймовірності пробою[2].

Знаючи закон розподілу, можна обчислити витримувану напруженість електричного поля, якщо детально відомі розміри і форма поверхневих неоднорідностей. Варто пам'ятати, що електрична міцність в кожному конкретному випадку буде залежати також і від ступеня вільних частинок. Тому математичний опис явищ в забрудненому розрядному проміжку стає затрудненим і пробивна напруженість і напруга визначаються в цьому разі лише експериментально[2].

Для наближеної оцінки пробивної напруги при невеликому числі вимірювань пробивної напруги ( $n \ll 20$ ) можна скористатися законом

нормального розподілу. Слід, мати на увазі, що відхилення від цього закону будуть тим більшими, чим вище тиск і ступінь забруднення[2].

Як правило, розподіл пробивної напруженості поля виражається подвійним показовим законом або логарифмічним подвійним показовим законом[2].

Стан поверхні електродів і процеси, які відбуваються біля поверхні, особливо при підвищеному тиску газу, визначають вплив площі електродів на розрядну напруженість, причому залежність початкової напруги від площі електродів при імпульсних впливах інша ніж при промисловій частоті. Внаслідок цього спостерігається зростання коефіцієнта імпульсу навіть в однорідному полі. Збільшення поверхні електродів, наприклад збільшення довжини коаксіальних циліндрів, призводить до збільшення ймовірного пробою і зміни функції розподілу  $U_{пр}$  і  $E_{пр}$ . Однак при досить великих площах електродів ( $10^5$  см<sup>2</sup> і більше) початкова напруженість вже практично не залежить від розмірів поверхні[2].

Збільшення ймовірності пробою і зміна функцій розподілення пробивної напруги і пробивної напруженості спостерігається також і при збільшенні часу впливу високої напруги. І. М. Бортник з співробітниками приводить такий вираз, що враховує час впливу високої напруги:

$$E_{пр}(t) = E_{пр}(1)(1 - 0.025lgt) \quad (19)$$

де  $E_{пр}(1)$  - пробивна напруженість поля при промисловій частоті, отримана при випробуваннях зі швидкістю підйому напруги 1 кВ/с;  $t$  - час впливу напруги, с.

Рівняння (19) показує, що проміжок часу, протягом якого можливий пробій при напруженості  $E_{пр}(t) = 0.9E_{пр}(1)$ , дорівнює приблизно 3 год, а при  $E_{пр}(t) = 0.8E_{пр}(1)$  він становить кілька років[2].

### **Висновки до другого розділу.**

Проведено детальне ознайомлення із застосування елегазу в якості ізоляційного середовища. Розглянуті особливості електричного пробою

елегазу та електричної міцності проміжків з однорідним та неоднорідним електричним полем. Розглянуті особливості застосування сумішей елегазу з іншими газами та їх вплив на електричну міцність проміжків.

### **3. ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ЕТАЛОННИЙ КОНДЕНСАТОР З ЕЛЕГАЗОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ НА 600кВ**

#### **3.1 Еталонні конденсатори стиснутого газу, типу MCP**

Стандартні конденсатори стиснутого газу застосовуються в дільниках напруги для точних вимірювань напруги. Отже, стандартні конденсатори стиснутого газу використовуються в високовольтних лабораторіях як компоненти еталонних вимірювальних систем для калібрування вимірювальних систем змінної напруги відповідно до ІЕС 60060-2. Крім того, стандартні конденсатори стиснутого газу є еталонною ємністю мостових схем для точних вимірювань ємностей і коефіцієнтів втрат. Газові стандартні конденсатори використовуються в якості основи для еталонів змінної напруги національних стандартів[3].

Конденсатори газонаповнені вимірювальні MCP, MCF представляють собою систему коаксіально розташованих металевих електродів, що утворюють вимірювальні ємності C1 і C2, поміщених в замкнутий об'єм, наповнений гексафторидом сірки SF<sub>6</sub> (для MCP) або сумішшю газів на основі двоокису вуглецю CO<sub>2</sub> (для MCF). Заповнення конденсаторів стисненим газом здійснюється від балона високого тиску через редуктор і вакуумний голчастий вентиль, вмонтований в нижній фланець конденсаторів. Для контролю тиску стисненого газу в об'ємі конденсаторів на нижньому фланці кожного примірника конденсатора встановлений манометр[3].

Циліндричні корпуси конденсаторів виготовлені з склотекстоліту (для конденсаторів MCP) або гетинаксу (для конденсаторів MCF). Верхній і нижній металеві фланці герметично з'єднані через ущільнюючі прокладки з торцями корпусів за допомогою болтових з'єднань. Введення високої напруги забезпечені високовольтним екраном, зібраним з окремих металевих дисків, що утворюють сферичну поверхню. Корпуси конденсаторів закріплені на металевій основі (платформі). Платформи конденсаторів забезпечені колесами зі стопорами для переміщення в межах високовольтного залу[3].

Вимірювальні вводи ємностей C1 і C2 виконані за допомогою герметичних прохідних ізоляторів і з'єднані з роз'ємами LEMO-3S (основна ємність) і N-типу (допоміжна ємність), розміщеними в коробці, закріпленій на платформі конденсаторів. Для захисту вимірювальних приладів, що приєднуються до конденсаторів, в коробці встановлено захисні розрядники «Epcos» з розрядною напругою 1000В. Через використання коаксіального електродного пристрою стиснутого газу стандартні конденсатори мають наступні переваги:

1. Висока стабільність ємності.
2. Незначний коефіцієнт діелектричних втрат.
3. Без часткових скидів тиску.
4. Дві окремі вимірювальні ємності для паралельних вимірів, наприклад напруги та ємності.

Для досягнення високої внутрішньої міцності ізоляція гексафториду сірки газу SF<sub>6</sub> наповнюється під робочий тиск 4 бари. Ізоляційні труби з поліефірної смоли з армованого скловолокна забезпечують високу механічну міцність під тиском. За винятком періодичної очистки поверхні ізоляційної труби та періодичної перевірки тиску газу, стандартні конденсатори стиснутого газу не потребують будь-якого обслуговування[3].

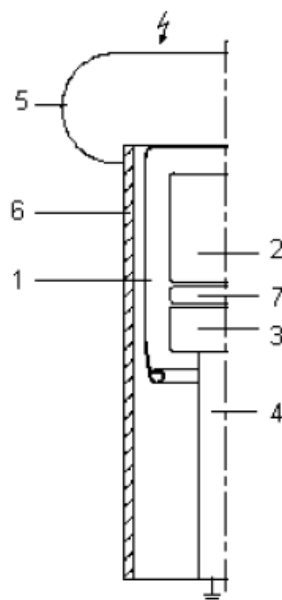


Рис 3.1. Принцип розташування електродів

1. Внутрішній високовольтний електрод.
2. Вимірювальний електрод C1.
3. Вимірювальний електрод C2.
4. Механічне закріплення вимірювальних електродів.
5. Зовнішній високовольтний електрод.
6. Склотекстоліт.
7. Заземлений екранний електрод.

Таблиця 3.1. Стан експлуатації[3]

Температурний діапазон	° C	5 ... 40
Відносна вологість (при $\theta \leq 30$ ° C)	%	$\leq 75$
Висота над рівнем моря	м	$\leq 1000$



Установка		У приміщенні
Робочий тиск (надлишковий тиск)	бар	4
Випробувальний тиск (відповідно до технічних регламентів німецької організації технічного огляду TÜV)	бар	6

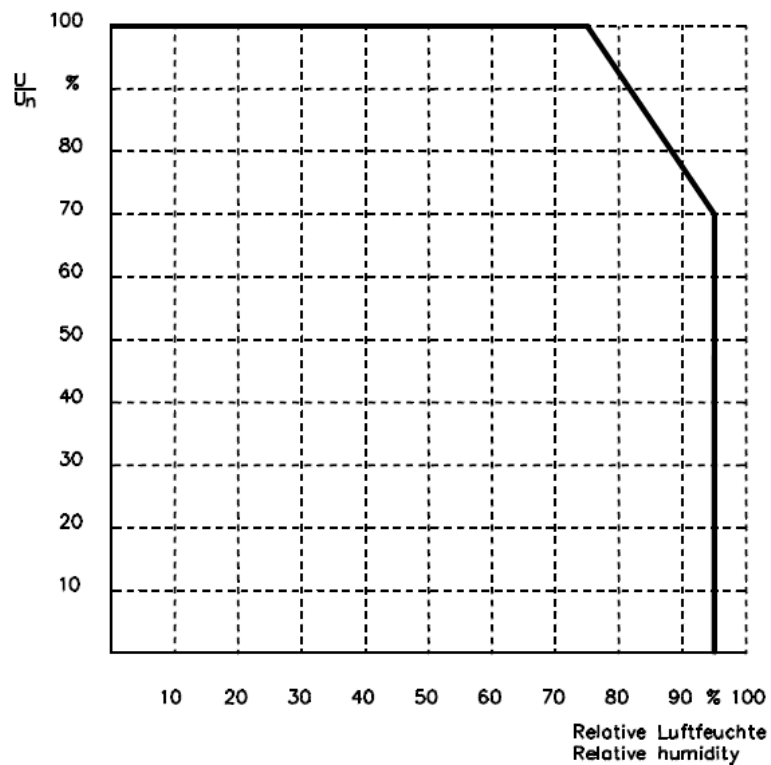


Рис. 3.2. Допустима висока напруга в залежності від відносної вологості навколишнього повітря

Таблиця 3.2. Умови зберігання[3]

Температура навколишнього середовища для зберігання при робочому тиску	°C	5 ... 40
--	----	----------

Температура навколишнього середовища для зберігання на макс. 0.5 бар надлишкового тиску	°C	- 25 ... 50
Відносна вологість (при $\theta \leq 30$ ° C)	%	$\leq 75$

Таблиця 3.3. Умови транспортування[3]

Температура навколишнього середовища	°C	$\leq 20$
Макс. допустимий тиск в конденсаторі стиснутого газу	бар	$< 2$ (200 кПа)
Позиція в транспортній коробці		МСП 100 і МСП 200: вертикальне положення МСП 300 до МСП 800: горизонтальне положення
Наповнення SF6		Після транспортування

Таблиця 3.4. Технічні параметри[3]

Тип	Номінальна напруга, кВ	Тестувальна напруга, кВ	Номінальна ємність, С1	Номінальна ємність, С2
МСП 100	100	110	100	-
МСП 200	200	220	100	16
МСП 300	300	330	100	16
МСП 350	350	385	100	16

MCP 400	400	440	100	16
MCP 500	500	550	50	14
MCP 600	600	660	50	14
MCP 700	700	770	50	19
MCP 800	800	880	50	19

Ізоляційний газ:

SF<sub>6</sub>, якість відповідно до IEC 60 376

Аксесуари (доступні за запитом):

- вимірювальний кабель, односекційний або подвійний, довжина 5 м, 10 м, 25 м або 50 м.
- газонаповнювальний апарат, що містить клапан для редукції тиску та з'єднувальні пристрої.

Таблиця 3.5. Метрологічні характеристики[3]

Найменування характеристики	Значення
Допустиме відхилення основної та допоміжної ємності від номінального значення ( $\Delta C$ )	$\pm 5 \%$
Межі допустимої додаткової помилки відтворення ємності - для виконання MCP - для виконання MCF	$\pm 0,05 \%$ $\pm 0,2 \%$
Межі допустимої додаткової помилки відтворення ємності, обумовлено впливом температури	$\pm 0,003 \% / ^\circ\text{C}$

навколишнього повітря в діапазоні робочих температур (ТКЕ)	
Межі допустимої додаткової помилки відтворення ємності, обумовлені відхиленням тиску робочого газу від номінального тиску в конденсаторі	$\pm 2,2 \cdot 10^{-6} \% / \text{Па}$
Додаткова помилка відтворення ємності, обумовлена зміною робочої напруги в діапазоні від 0,1 до $U_{\text{ном}}$ , не перевищує 0,003%	
Тангенс кута втрат $\text{tg } \delta$ не перевищує $1 \cdot 10^{-5}$	

Таблиця 3.6. Розміри та вага [3]

Тип	Висота, мм	Розміри (А*А) мм	Вага, кг
МСП 100	950	420 x 420	46
МСП 200	1370	750 x 750	130
МСП 300	2350	1100 x 1100	220
МСП 350	2600	1200 x 1200	345
МСП 400	2600	1200 x 1200	345
МСП 500	3400	1400 x 1400	660

МСП 600	3400	1400 x 1400	660
МСП 700	4200	2000 x 2000	1450
МСП 800	4200	2000 x 2000	1450



Рис. 3.4. МСП 600

### Калібрування

Конденсатори стиснутого газу відкалібровані калібрувальною лабораторією HIGHVOLT D-K-19153-01-00. Калібрування задокументовано сертифікатом калібрування DAkkS. Цей сертифікат калібрування документує

відстеження до національних стандартів, які реалізують одиниці вимірювань відповідно до Міжнародної системи одиниць (СИ) [3].

### **Висновки до третього розділу.**

Розглянуті особливості конструкції високовольтних еталонних конденсаторів з елегазовою ізоляцією на класи 100 – 800 кВ, які досліджуються в магістерській дисертації, визначені розміри їх складових елементів, умови зберігання та транспортування, а також технічні параметри та метрологічні характеристики.

#### 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЕТАЛОННОГО КОНДЕНСАТОРА З ЕЛЕГАЗОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ НА 600кВ

##### 4.1. Математична модель зміни характеристик високовольтного еталонного конденсатору

Розглянемо систему циліндричних координат  $r\theta z$ . Відповідно до формули [5], приймаємо, що рівнодіюча сила  $P$ , яка спричиняє деформацію електроду ВЕ в напрямку осі  $0r$ , прикладена по координаті  $z_p$ , значення якої відноситься до середини колони  $C1 \dots C2$  ( $z_p = 0.5$  м). В такому випадку зсув осі ВЕ при координаті  $z = z_p$  в напрямку осі  $0r$  буде вираховуватись за формулою [5]:

$$\Delta r_p = \frac{P * z_p^3}{3 * E * J} \quad (1)$$

де  $E$  це модуль пружності матеріалу та  $J$  – момент опору перерізу ВЕ при вигині [5].

Врахуємо також, що при координаті  $z = z_p$  вісь ВЕ відхиляється від осі  $0z$  на кут [5]:

$$\theta = \frac{P * z_p^2}{2 * E * J} \quad (2)$$

Зміщення осі ВЕ при координаті  $z = z_1$  ( $z_1 < z_p$ ) можна вирахувати за формулою [5]:

$$\Delta r_{z_1 < z_p} = \frac{P * z_p^3}{6 * E * J} * \left[ 2 - 3 * \left( \frac{z_p - z_1}{z_p} \right) + \left( \frac{z_p - z_1}{z_p} \right)^3 \right] \quad (3)$$

Для визначення зміщення осі ВЕ при координаті  $z > z_p$ , потрібно врахувати значення кута  $\theta$  за (2) при координаті  $z > z_p$ . В результаті з формул (1 - 3) можна вивести [5]:

$$\Delta r_{z_1 > z_p} = \frac{P * z_p^3}{3 * E * J} * \left[ 1 + 3/2 * \left( \frac{z - z_p}{z_p} \right) \right] \quad (4)$$

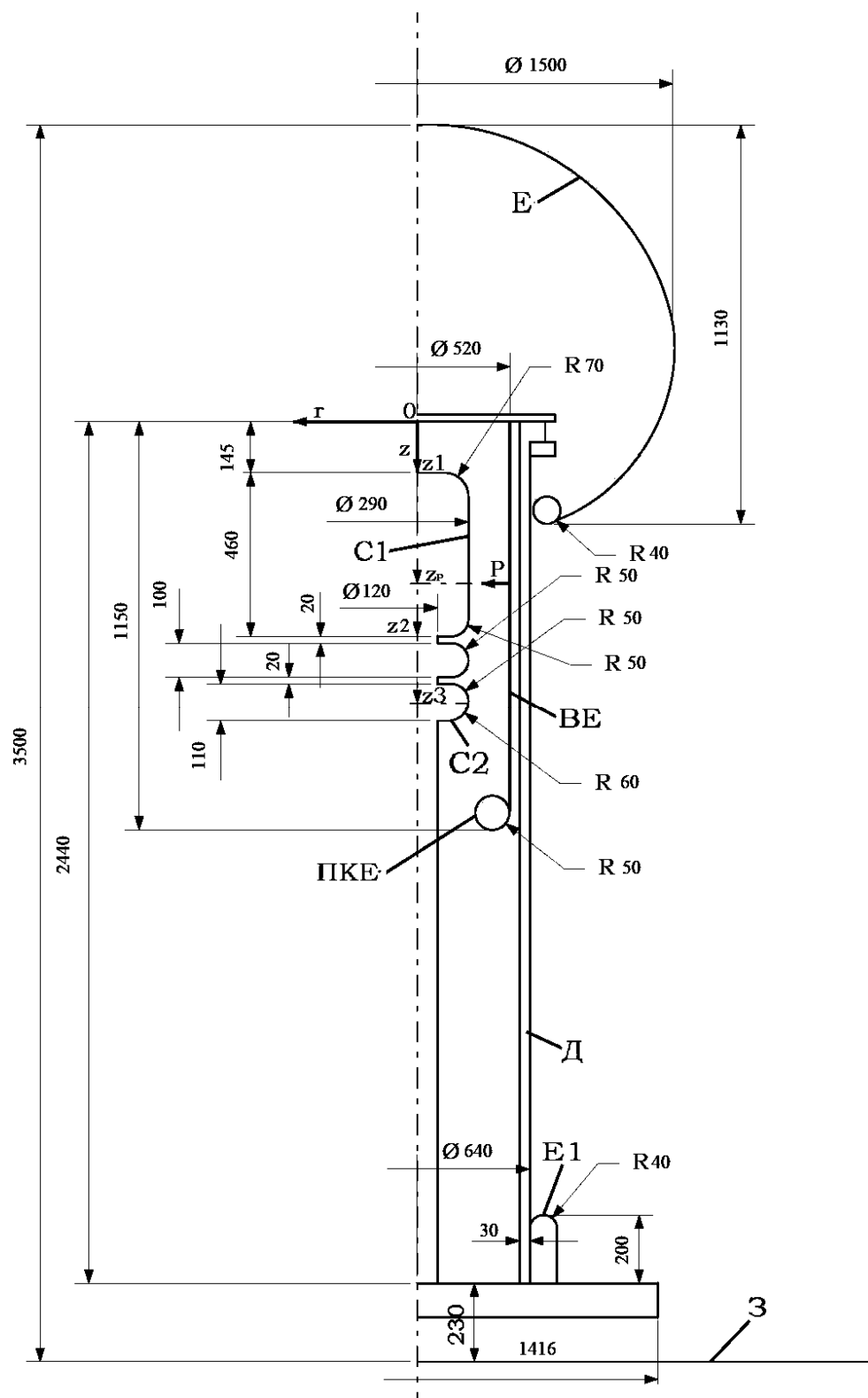


Рис. 4.1. Схема будови високовольтного еталонного конденсатору МСР-600

Згідно рис. 4.1. система електродів еталонного конденсатору має визначення:



$z_1$  – початок електроду ємності  $C_1$  ( $z_1 = 0.145\text{м}$ );

$z_2$  – закінчення електроду ємності  $C_1$  ( $z_2 = 0.605\text{м}$ );

$z_3$  – середина електроду ємності  $C_1$  ( $z_3 = 0.8\text{м}$ ).

Так як зміщення електроду ВЕ відносно  $C_1$  є дуже малим, то значення зміщення його осі можна визначити так:

$$\Delta r_{C_1} = \frac{\Delta r_{z_1} + \Delta r_{z_2}}{2} \quad (5)$$

де  $\Delta r_{z_1}$  визначається з формулою (3), а відповідно  $\Delta r_{z_2}$  за формулою (4) при підстановці  $z = z_2$ . Зміщення осі ВЕ відносно середини електроду  $C_2$  можна розрахувати за формулою (4) при підстановці  $z = z_3$ [5].

Тому з наведених формул, при підстановці певних значень  $z_1, z_2, z_3$  одержимо співвідношення:

$$\frac{\Delta r_{C_1}}{\Delta r_{C_2}} = 2.659, \quad (6)$$

тобто, зміщення осі ВЕ у області розташування  $C_2$  у 2.66 разів більше відповідного зміщення для області  $C_1$ [5].

#### **4.2. Розрахунок ємностей еталонного конденсатору МСР 600 при зміщенні їх осей**

##### **Нульовий варіант ( $d = 0\text{мм}$ )[7]**

Вихідні дані:

$$\varepsilon = 1$$

$$\varepsilon_0 = 8.854 * 10^{-12}$$

$$\Delta r_{C_1} = 0 \text{ м}$$

$$\Delta r_{C_2} = \Delta r_{C_1} * 2.66 = 0 \text{ м}$$

$$C_1 = 0.145 \text{ м}$$

$$C_2 = 0.145 \text{ м}$$

$$l_1 = 0.46 \text{ м}$$

$$l_2 = 0.11 \text{ м}$$

$$r_1 = 0.145 \text{ м}$$

$$r_2 = 0.26 - 0.006 = 0.254 \text{ м}$$

$$C_{10} = \frac{2 * \pi * \varepsilon * \varepsilon_0 * l_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln\left(\frac{0.254}{0.145}\right)}$$

$$C_{10} = 4.5648206384 * 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$C_{20} = \frac{2 * \pi * \varepsilon * \varepsilon_0 * l_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.11}{\ln\left(\frac{0.254}{0.145}\right)}$$

$$C_{10} = 1.091587544 * 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$\frac{C_{20}}{C_{10}} = 0.2391304348$$

**Перший варіант (d = 0.00002 м) [7]:**

$$R_1 = 0.145 \text{ м}$$

$$R_2 = 0.26 - 0.006 = 0.254 \text{ м}$$

$$d_1 = 0.00002 \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_1} - d_1 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{0.00002} - 0.00002 \right)$$

$$s_1 = 1.08727499 * 10^3 \text{ м}$$

$$s_2 = d_1 + s_1 = 0.00002 + 1.08727499 * 10^3 = 1.08727501 * 10^3 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(1.08727499 * 10^3)^2 - (0.145)^2} = 1.0872749803 * 10^3 \text{ м}$$

$$C_{11} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_1}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(1.08 \dots * 10^3 + 1.0872749803 * 10^3)(1.08 \dots * 10^3 - 1.0872749803 * 10^3)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{11} = 4.5648207334 * 10^{-11} \Phi$$

$$d_2 = d_1 * 2.66 = 5.32 * 10^{-5} \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_2} - d_2 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{5.32 * 10^{-5}} - 5.32 * 10^{-5} \right)$$

$$s_1 = 408.7499733999 \text{ м}$$

$$s_2 = d_2 + s_1 = 5.32 * 10^{-5} + 408.7499733999 = 408.7500266 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(1.08727499 * 10^3)^2 - (0.145)^2} = 408.7499476813 \text{ м}$$

$$C_{21} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_2}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(408.7499733999 + 408.7499476)(408.7500266 - 408.7499476)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{21} = 1.0915876705 * 10^{-11} \Phi$$

$$\frac{C_{21}}{C_{11}} = 0.2391304575$$

**Другий варіант (d = 0.00004 м) [7]:**

$$R_1 = 0.145 \text{ м}$$

$$R_2 = 0.26 - 0.006 = 0.254 \text{ м}$$

$$d_1 = 0.00004 \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_1} - d_1 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{0.00004} - 0.00004 \right)$$

$$s_1 = 543.63748 \text{ м}$$

$$s_2 = d_1 + s_1 = 0.00004 + 543.63748 = 543.63752 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(543.63748)^2 - (0.145)^2} = 543.6374606627 \text{ м}$$

$$C_{11} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_1}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(543.63748 + 543.6374606627)(543.63752 - 543.6374606627)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{11} = 4.5648209419 * 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$d_2 = d_1 * 2.66 = 1.064 * 10^{-4} \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_2} - d_2 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{1.064 * 10^{-4}} - 1.064 * 10^{-4} \right)$$

$$s_1 = 204.3749468 \text{ м}$$

$$s_2 = d_2 + s_1 = 1.064 * 10^{-4} + 204.3749468 = 204.3750532 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(204.3749468)^2 - (0.145)^2} = 204.3748953627 \text{ м}$$

$$C_{21} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_2}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(204.3749468 + 204.3748953627)(204.3750532 - 204.3748953627)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{21} = 1.091588051 * 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$\frac{C_{21}}{C_{11}} = 0.23913053$$

**Третій варіант (d = 0.00006 м) [7]:**

$$R_1 = 0.145 \text{ м}$$

$$R_2 = 0.26 - 0.006 = 0.254 \text{ м}$$

$$d_1 = 0.00006 \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_1} - d_1 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{0.00006} - 0.00006 \right)$$

$$s_1 = 362.42497 \text{ м}$$

$$s_2 = d_1 + s_1 = 0.00006 + 362.42497 = 362.42503 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(362.42497)^2 - (0.145)^2} = 362.424940994 \text{ м}$$

$$C_{11} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_1}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(362.42497 + 362.424940994)(362.42503 - 362.424940994)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{11} = 4.5648213102 * 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$d_2 = d_1 * 2.66 = 1.596 * 10^{-4} \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_2} - d_2 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{1.596 * 10^{-4}} - 1.596 * 10^{-4} \right)$$

$$s_1 = 136.2499202 \text{ м}$$

$$s_2 = d_2 + s_1 = 1.596 * 10^{-4} + 136.2499202 = 136.2500798 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(136.2499202)^2 - (0.145)^2} = 136.249843044 \text{ м}$$

$$C_{21} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_2}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(136.2499202 + 136.249843044)(136.2500798 - 136.249843044)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{21} = 1.0915886846 * 10^{-11} \Phi$$

$$\frac{C_{21}}{C_{11}} = 0.2391306495$$

**Четвертий варіант (d = 0.00008 м) [7]:**

$$R_1 = 0.145 \text{ м}$$

$$R_2 = 0.26 - 0.006 = 0.254 \text{ м}$$

$$d_1 = 0.00008 \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_1} - d_1 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{0.00008} - 0.00008 \right)$$

$$s_1 = 271.81871 \text{ м}$$

$$s_2 = d_1 + s_1 = 0.00008 + 271.81871 = 271.81879 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(271.81871)^2 - (0.145)^2} = 271.8186713253 \text{ м}$$

$$C_{11} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_1}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(271.81871 + 271.8186713253)(271.81879 - 271.8186713253)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{11} = 4.5648218343 * 10^{-11} \Phi$$

$$d_2 = d_1 * 2.66 = 2.128 * 10^{-4} \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_2} - d_2 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{2.128 * 10^{-4}} - 2.128 * 10^{-4} \right)$$

$$s_1 = 102.187393599 \text{ м}$$

$$s_2 = d_2 + s_1 = 2.128 * 10^{-4} + 102.187393599 = 102.1876064 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(102.187393599)^2 - (0.145)^2} = 102.1872907252 \text{ м}$$

$$C_{21} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_2}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(102.187393599 + 102.1872907252)(102.1876064 - 102.1872907252)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{21} = 1.0915895715 * 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$\frac{C_{21}}{C_{11}} = 0.2391308163$$

**П'ятий варіант (d = 0.000097 м) [7]:**

$$R_1 = 0.145 \text{ м}$$

$$R_2 = 0.26 - 0.006 = 0.254 \text{ м}$$

$$d_1 = 0.000097 \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_1} - d_1 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{0.000097} - 0.000097 \right)$$

$$s_1 = 224.1803638711 \text{ м}$$

$$s_2 = d_1 + s_1 = 0.000097 + 224.1803638711 = 224.1804608711 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(224.1803638711)^2 - (0.145)^2} = 224.1803169781 \text{ м}$$

$$C_{11} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_1}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(224.18036387 + 224.1803169781)(224.1804608711 - 224.1803169781)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{11} = 4.5648223999 * 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$d_2 = d_1 * 2.66 = 2.5802 * 10^{-4} \text{ м}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} * \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d_2} - d_2 \right) = \frac{1}{2} * \left( \frac{0.254^2 - 0.145^2}{2.5802 * 10^{-4}} - 2.5802 * 10^{-4} \right)$$

$$s_1 = 84.2782215055 \text{ м}$$

$$s_2 = d_2 + s_1 = 2.5802 * 10^{-4} + 84.2782215055 = 84.2784795255 \text{ м}$$

$$a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(84.2782215055)^2 - (0.145)^2} = 84.2780967697 \text{ м}$$

$$C_{21} = \frac{2 * \pi * \varepsilon_0 * l_2}{\ln \left[ \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 * R_2} \right]}$$

$$= \frac{2 * 3.14 * 8.854 * 10^{-12} * 0.46}{\ln \left[ \frac{(84.2782215055 + 84.2780967697)(84.2784795255 - 84.2780967697)}{0.145 * 0.254} \right]}$$

$$C_{21} = 1.0915905246 * 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$\frac{C_{21}}{C_{11}} = 0.2391309955$$

$$\frac{C_{21}}{C_{11}} / \frac{C_{20}}{C_{10}} = 1.0000023447 \text{ досягнуте значення. Для знайденого значення}$$

$$d_1 = 0.000097 \text{ м визначимо значення } C1 \text{ та в результаті одержимо}$$

$$C1 = 4.5648223999 * 10^{-11} \text{ Ф. Отже відношення } \frac{C_{11}}{C_{10}} = 1.0000003859 \text{ та}$$



звідси впливає значення зміни ємності  $\Delta C_1$  еталонного конденсатора, що дорівнює 0.00038%. Для визначення КНЄ конденсатора дане значення необхідно поділити на відповідну зміну напруги, що дорівнює 520 кВ. Отже, шукане значення КНЄ конденсатора дорівнює  $0.00038\% : 520 \text{ кВ} = 0,00000073$ .

### **Висновки до четвертого розділу.**

Розроблена математична модель коефіцієнта напруги ємності високовольтного еталонного конденсатора та розраховане його значення, що ґрунтується на основі експериментально визначеної зміни відношення  $C_2/C_1$  конденсатора при збільшенні його напруги від 0 до 520 кВ. Тим самим показано, що зміна ємності  $C_1$  високовольтного еталонного конденсатора в 79 разів менше його нормованого значення.

## **5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ**

### **Вступ**

В даному розділі магістерської дисертації розглядається ідея розроблення стартап-проекту по запропонованому методу визначення нестабільності ємності еталонного конденсатора, який дозволить підвищити його точність, в порівнянні з існуючими конкурентним рішенням. Розділ розділено на такі основні етапи:

1. Опис ідеї технології.
2. Технологічний аудит ідеї проекту.
3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.

### **5.1. Опис ідеї проекту**

Конденсатори зі стисненим газом головним чином застосовуються в якості еталонів в вимірах кута діелектричних втрат, при випробуваннях високовольтних трансформаторів за допомогою ємнісних подільників напруги. Також важливо, щоб використовувані високовольтні конденсатори були без втрат і мали постійні параметри.

Іншими областями застосування, в яких важливо не стільки відсутність втрат, скільки сталість величини ємності, є вимір ефективних і пікових напруг, визначення коефіцієнта амплітуди, отримання осцилограм форми хвилі.

Зазвичай не потрібно точне знання величини ємності таких конденсаторів, які можуть бути виміряні тільки з точністю до 0,1%. Наприклад, вимірювання, проведені на трансформаторах напруги за допомогою ємнісних подільників напруги, вимагають дуже точної установки відносно ємності, яка повинна бути постійною і має не залежати від температури. В такому дільнику відношення ємностей можна визначати значно точніше, ніж абсолютні величини цих ємностей. Відносно омичних

дільників напруги аналогічне твердження не вірне. Низьковольтне плече ємнісного дільника зазвичай складається з високоякісних слюдяних конденсаторів, температурна залежність яких може бути абсолютно однаковою з температурною залежністю конденсаторів, наповнених стиснутим газом. При підвищенні температури на  $10^{\circ}\text{C}$  тиск газу в конденсаторі зростає на 3,67%, тобто, наприклад, від 14 до 14,5 атмосфер. Підвищення тиску на 0,5 атмосфер збільшує діелектричну постійну азоту на 0,029%, а отже, і ємність конденсатора зі стисненим газом (азотом) на ту ж величину. Можуть бути внесені поправки на малий кут втрат слюдяних конденсаторів, так як цю величину можна вимірювати досить точно. У дуже точних вимірах при порівнянні трансформаторів напруги з еталонними дільниками повинна прийматися до уваги і мала похибка цих еталонів.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження більш точного еталонного конденсатору	Електричні станції, підстанції та електротехнічні лабораторії	Використання даного еталонного конденсатору дозволить більш точно вимірювати напругу та коефіцієнт амплітуди

Для успішного використання ідеї необхідно визначити потенційні сильні, слабкі та нейтральні сторони проекту та провести аналіз конкурентоспроможності, техніко-економічних особливостей та відмінності серед вже існуючих аналогів. Проведений порівняльний аналіз показників для власної ідеї та їх показники: а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні).

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики	Конкурент	Мій проект	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Еталонний конденсатор МСР 600	Еталонний конденсатор МСР 600(мод)			
1	Додаткова помилка відтворення ємності, обумовлена зміною робочої напруги в діапазоні від 0,1 до $U_{ном}$	0.003 %	0.000038%			+
2	Допустиме відхилення основної та допоміжної ємності від номінального значення ( $\Delta C$ )	$\pm 5$ %	$\pm 5$ %		+	
3	Маса	660 кг	660 кг		+	
4	Ризик загоряння	-	-		+	
5	Висока ціна	-	-		+	

Даний перелік слабких, сильних і нейтральних характеристик та властивостей ідеї дав зрозуміти, що слабких сторін немає.

## 5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу ми проведемо аудит технології, за допомогою якої можна відтворити ідею проекту. Аналіз складових для визначення технологічної здійсненності ідеї проекту (табл. 5.3.).

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Впровадження більш точного еталонного конденсатору	Дану модель можна створити підібравши правильне відношення ємності в еталонному конденсаторі	Дана технологія наявна, але її потрібно доробити	Авторам проекту вони доступні.

Аналізуючи дані, що продемонстровані в таблиці 5.3, для реалізації проекту, потрібно в даній моделі підібрати правильне відношення ємності в еталонному конденсаторі C1 до C2.

### 5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному розділі будуть проаналізовані ринкові можливості запуску нової моделі еталонного конденсатору та методу моделювання в якому необхідно виконати з урахуванням незначного збільшення вартості випробувань.

Проведемо аналіз попередньої характеристики потенційного ринку стартап-проекту (табл. 5.4.)

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	7
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	-
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Коливається
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність ІЕС
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	67%

В результаті аналізу таблиці 5.4. можна відзначити, що вихід на ринок не має великих перешкод та є рентабельним для інвестування.

Клієнтами є група підприємств, електростанції чи підстанції чи підприємства, що займаються ремонтом та діагностикою.

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Створення більш точніших вимірювальних еталонних конденсаторів	Електричні станції, підстанції та електротехнічні лабораторії	Поведінку клієнта повинна відповідати стандартам ІЕС	Відповідність стандартам ІЕС та ДСТУ в галузі електротехніки. Застосовувати лише в електротехніці.

В таблицях 5.5 та 5.6 проведений аналіз ринкового середовища, його фактори перешкоди та реалізації.

Таблиця 5.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Фінансування	Можливий варіант дефіциту фінансування для купівлі обладнання та оренди приміщення під нього.	Пошук інвесторів для фінансової допомоги
2	Аудиторія	Дефіцит потенційних клієнтів	Невигідність праці

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Новизна продукції	Зацікавленість клієнтів на ринку електроенерготехніки	Позитивна
2	Новизна методу	Можливість зацікавлення клієнтів з інших країн	Позитивна

Таблиця 5.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - чиста	Велика кількість потенційних конкурентів	Виготовлення більш якісної продукції, що не буде сильно впливати на ціну
2. За рівнем конкурентної боротьби - інтернаціональна	Реєстрація виробників в різних країнах світу	Можливість продажу як в Україні та і в інших країнах світу
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Даний продукція застосовується лише в електротехніці	Ринок продажу продукції обмежений певними компаніями
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Дану продукцію випускають невелика кількість компаній	Дає змогу набути більшого попиту на ринку
5. За характером конкурентних переваг - Цінова	Дана продукція майже не змінна в ціні серед її аналогів	Особливістю цього є кращі характеристики, що буде супроводжуватись попитом на ринку
6. За інтенсивністю -немарочна	Продукція немає логотипу	Підвищення її попиту серед конкурентів

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Highvolt	Доступ до ресурсів	Власна компанія	Укрдержмет рстандарт	Ціна
<b>Висновки</b>	Зменшення конкурентів зі збільшення якості продукції	Вихід на ринок є. Потенційні конкуренти наявні	Постачальники диктують обсяги та ціну на ринку	Все залежить від умов використання	Загроза появи схожого товару присутня, але це не вплине на попит серед гравців

Провівши аналіз таблиці 5.9 можна зробити висновок, що цей продукт буде перспективним та буде мати попит серед електротехнічних лабораторій та науково дослідних центрів, що займаються створенням та дослідженням модернізованих еталонних конденсаторів.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Якість	Продукція, яка буде відповідати стандартам ІЕС
2	Новизна	Новизна продукції, яка буде робити його актуальним серед покупців
3	Ціна	Можливість виставлення такої ціни, яка дозволить отримати прибуток, а не збиток для компанії
4	Обсяг	Можливість створювати продукт в постійному режимі

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Якість	17		X					
2.	Новизна	15		X					
3.	Ціна	15				X			
4.	Обсяг	10						X	



Аналізуючи таблицю 5.11. можна зробити висновок про те, що даний продукт набуде швидкого попиту, так як з головних його переваг є якість та новизна. Але серед переваг є також інша сторона, на початковому етапі, створювати даний продукт у великому обсязі буде непросто, тому в нашому випадку потрібно налагодити певні зв'язки з компаніями, які створюють комплектуючі, і надалі зріст попиту зможе відповідати і нашим можливостям.

Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<u>Сильні сторони:</u> Якість а новизна продукту;	<u>Слабкі сторони:</u> Обсяги виробництва та мала сума для реалізації продажу даного продукту;
<u>Можливості:</u> Продаж даного продукту на ринку;	<u>Загрози:</u> Можливий малий попит на старті продажу;

На основі порівняльного SWOT-аналізу стартап-проекту час для виведення на ринок буде оптимальним тоді, коли сума для реалізації продажу даного продукту буде достатньою, що дасть можливість реалізувати продаж даного продукту в повній мірі.

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Проведення реклами та пошук потенційних покупців	Залежить від якості пошуку та ефективності реклами	Бажано робити якнайшвидше, для набуття більшого попиту серед покупців
2	Закупівля комплектуючих та збільшення робочого персоналу для реалізації великої кількості вироблення продукції	Більш ймовірно отримати ресурс та збільшити кількість кваліфікованих робітників	Якнайшвидше перед виходом на ринок

## 5.4. Розроблення ринкової стратегії

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачі в сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Обслуговування електроустаткування на станціях та підстанціях	Готові	Великий попит	Можлива	середньо
2	Науково-дослідні центри	Готові	Великий попит	Можлива	середньо
Які цільові групи обрано: електричні станції, підстанції, науково-дослідні центри та електротехнічні лабораторії					

Компанія зосереджена на двох цільових групах, тому збут продукції матиме масовий характер охоплення ринку.

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Проведення реклами та пошук потенційних покупців. Закупівля комплектуючих та збільшення робочого персоналу для реалізації великої кількості вироблення продукції	Здобуття переваги на ринку як в Україні так і в інших країнах світу	Якість створеного продукту та швидкість його виробництва	Стратегія спеціалізації

Таблиця 5.17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<b>№ п/п</b>	<b>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</b>	<b>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</b>	<b>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</b>	<b>Стратегія конкурентної поведінки*</b>
	Так	Так	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші.

Таблиця 5.18. Визначення стратегії позиціонування

<b>№ п/п</b>	<b>Вимоги до товару цільової аудиторії</b>	<b>Базова стратегія розвитку</b>	<b>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</b>	<b>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</b>
	Відповідність до стандарту ІЕС та ДСТУ в Україні	Стратегія спеціалізації	Новинка та якість	Надійність, точність та окупність

## 5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 5.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<b>№ п/п</b>	<b>Потреба</b>	<b>Вигода, яку пропонує товар</b>	<b>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</b>
	Точність, якість та ефективність вимірювання	Більш точні вимірювання	Новизна та точність

Таблиця 5.18. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I.                   Схема високовольтного еталонного конденсатору	Забезпечення повної ефективності роботи (точність вимірювання та стабільність)		
II. Високовольтний еталонний конденсатор	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Вимірювання напруги		
	2. Фіксація осцилограм вхідної напруги		
	Якість: ДСТУ та ІЕС		
	Пакування: вантажний транспортний засіб		
	Марка: високовольтний еталонний конденсатор		
III. Високовольтний еталонний конденсатор	До продажу: Високовольтний еталонний конденсатор		
	Після продажу: Високовольтний еталонний конденсатор		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання:  міжнародний патент на інтелектуальну власність.			

Таблиця 5.18. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	1800000грн/шт	2000000грн/шт	Високий	1700000-2200000грн/шт

Таблиця 5.18. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Оптова або роздрібна	Доставка за адресом через кур'єрські компанії або самовивіз	Дистрибуція через інтернет	Самовивіз

Таблиця 5.19. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Клієнти ознайомленні з електротехнікою вцілому, та мають досвід в перевірці відповідності даного продукту	Мобільний зв'язок, Viber, Telegram, Facebook, Skype та інші	Точність та новизна	Створити рекламу, яка зацікавить потенційного клієнта інформація якого дасть можливість знайти зв'язок з нашою компанією	Виділення новизни та якості продукту, яка не впливає на цінову політику серед конкурентів

Рекламу потрібно відобразити на одному із відомих рекламних сайтів та в соціальних мережах де обіг переглядів досягне високого рівня, що дозволить зацікавити більшу групу потенційних покупців

### Висновки до п'ятого розділу:

В даному розділі магістерської дисертації розроблений стартап-проект, в якому повністю розглянуті всі характеристики, що відносяться до модернізованого еталонного конденсатору, метод дослідження якого дозволяє проводити точніші виміри і буде мати попит серед електричних станцій та

підстанцій, електротехнічних лабораторій та організацій, що займаються моніторингом та діагностикою електричного обладнання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації проведений огляд високовольтних еталонних конденсаторів, а саме детально розглянуті конденсатори зі стисненим газом та їх використання. Проведено ознайомлення з вимогами, що пред'являються до конденсаторів, наповнених стисненим газом та оглянуто конструкції ІОГ – 250, ІОГ – 350, ІОГ – 450. Є реальним використання подібних конденсаторів на випробувальну напругу 1000кВ, в особливості, при застосуванні елегазової ізоляції під тиском до  $4 \cdot 10^5$  Па. Зроблений огляд високовольтної елегазової апаратури та випробувальних трансформаторів з елегазовою ізоляцією.

Це дозволило перейти до моделювання будови високовольтного еталонного конденсатору на робочу напругу до 520 кВ. Розроблена математична модель деформування високовольтних електродів конденсатору при зміні його вхідної напруги від 0 до 520 кВ. Виведені формули, які дозволяють взаємопов'язувати зміни геометричних параметрів електродів конденсатора при дії високої напруги.

На основі використання експериментально визначеної зміни коефіцієнта відношення ємностей конденсатора розраховано зміну основної ємності високовольтного конденсатора. Її розраховане значення в 79 разів менше граничних значень, наведених у паспортних даних конденсатора.

Таким чином, без суттєвого перероблення будови конденсатора, при мінімальних затратах можна суттєво підвищити його точність, що знайде застосування у високовольтних мережах при визначенні їх втрат електроенергії, коефіцієнта корисної дії, стану високовольтної ізоляції, показників якості електроенергії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Электрические аппараты высокого напряжения/ Под ред. Ю.И. Вишневого – СПб. : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2002, - 728 с.
2. Конструкция и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения. – Л: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 240 с.
3. <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV>
4. Точные электрические измерения, издательство иностранной литературы, Москва 1959.
5. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.; Отв. Ред. Писаренко Г. С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук думка, 1988. – 736 с.
6. Hillhouse, D. L., Peterson, A. E. A 300-kV Compressed Gas Standard Capacitor with Negligible Voltage Dependence. - IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. 1973. Vol. IM-22, No. 4, pp. 408-416
7. Теоретические основы электротехники, Часть 11, А. И. Даревский, Е. С. Кухаркин, издательство «Высшая школа» - 1965.